

Gestaltung eines Eisenbahn-Systemmodells für die Untersuchung von komplexen soziotechnischen Problemstellungen

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von: Dipl.-Geogr. Jürg Suter
aus: Thun (Schweiz)

eingereicht am: 13. Juni 2014
mündliche Prüfung am: 31. Juli 2014

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Eckehard Schnieder
Prof. Dr. Peter Winter

2014

Vorwort

Als Geograph ist mir das Zusammenspiel von induktiven und deduktiven Methoden vertraut. Ich bin es mir gewohnt, die Umwelt zu beobachten und daraus empirische Daten zu generieren, aus welchen Folgerungen gezogen werden können. Die aus diesen Erkenntnissen entwickelten Theorien bilden wiederum die Basis, Aussagen zu einzelnen Phänomenen herzuleiten. Aus heutiger Sicht bringt man das Eisenbahnsystem kaum mehr nur mit rein technischen Problemstellungen in Verbindung. Trotzdem erscheint es oft schwer, mit Darstellungen aus systemtheoretischer Perspektive in der Welt der Eisenbahn auf Verständnis zu stossen. Mit dieser Arbeit möchte ich die Herausforderung annehmen, am Beispiel eines Modells für die Simulation komplexer Situationen zwischen Mensch und Maschine zu betrachten. Es ist auch ein Versuch, die Vorgehensweisen der Geographie und der Ingenieurwissenschaften zu verbinden.

Mein persönliches Interesse an dieser Arbeit liegt insbesondere darin begründet, dass ich während 16 Jahren im Eisenbahnbetrieb und danach über weitere 6 Jahre im Bundesamt für Verkehr (BAV) als wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig war. Zwischenzeitlich habe ich an den Universitäten Bern und Zaragoza ein Studium in Geographie absolviert und mich dabei eingehend mit der Nachfrage nach Verkehrsleistungen und dem möglichen Angebot auf der Eisenbahnlinie Zaragoza - Canfranc - Pau durch die zentralen Pyrenäen befasst. Sowohl während dem Studium als auch während der Berufstätigkeit wurde ich mit Problemstellungen konfrontiert, die sich mit quantitativen Methoden nicht lösen lassen. Für deren wissenschaftliche Untersuchung fehlen häufig entsprechende Modelle oder die dazu notwendige Datenbasis. Dabei kommen auch qualitative Methoden zum Einsatz, bei denen die Wirklichkeit abstrahiert und formal beschrieben wird. Das vorliegende Forschungsprojekt macht es notwendig, mich auch mit der Welt der Ingenieure zu befassen.

Aus meinen Erfahrungen und Erkenntnissen ist das persönliche Bedürfnis entstanden, mich mit den übergeordneten Zusammenhängen der Modellierung zu befassen und daraus die vorliegende Arbeit zu verfassen. Sie hat insbesondere auch mit dem Aufbau und Betrieb eines eigenen Forschungslabors viel Aufwand verursacht. Es ist mir ein grosses Anliegen, allen Personen und Institutionen zu danken, welche mit ihrem Einsatz und Verständnis zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Ein ganz besonderer Dank geht dabei an:

- Professor Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. E. Schnieder für seine stets zuvorkommende und verständnisvolle Unterstützung und Betreuung während des ganzen Verlaufs der Promotionsarbeit. Seine zahlreichen Empfehlungen zusammen mit dem gewährten Freiraum hat dieses Ergebnis möglich gemacht,
- meinen Bruder Rolf, Lorenz Zahn, Mike von Aesch, Florian Fankhauser und den übrigen Vereinsmitgliedern für die unzähligen Arbeitsstunden, die sie im Zusammenhang mit dem Forschungslabor und zu Gunsten dieser Arbeit geleistet haben,
- Sebastian Straube und Fabian Riesen für die aufwändige Entwicklung einer Middleware für die Integration von Stellwerk- und Fahrsimulatoren im Forschungslabor,
- Hans-Lothar Kühn und Volkmar Herzog aus Lipsa im Osten Deutschlands für ihre grosszügigen Beiträge mit Rat und Tat zum gelungenen Aufbau des Forschungslabors,
- Reto Spring für das professionelle Erstellen und Betreiben der Homepage www.desm.ch, die als hervorragende Kommunikationsplattform viele Kontakte möglich machte,
- Hans G. Wägli für die vielen interessanten Gespräche und Hinweise aus der Geschichte der Eisenbahn und die Entwicklung der Sicherungstechnik,

- Professor Dr. Rohrer der Berner Fachhochschule Biel für die wertvolle Zusammenarbeit und die Unterstützung bei den Versuchen mit dem Simulationsprogramm LOCSIM,
- Oliver Bungers, Thomas Kassau und Stephan Michel der Firma Krauss-Maffei Wegmann KMW in München für ihre geduldige und ausdauernde Unterstützung beim Umzug des Simulators der Re 460,
- Professor Dr. Schindler, Leiter der Professur für Photogrammetrie und Fernerkundung an der ETH Zürich sowie Roman Salzgeber für die wertvolle Zusammenarbeit und die Entwicklung eines Ansatzes für die Signaldetektion in Videos,
- Nicole Stoller, Mirjam Schwager und Cédric Suter für die positive Zusammenarbeit während den Versuchsfahrten auf den Simulatoren im Labor und im Verlauf der Projekte ihrer Diplomarbeiten,
- Dr.-Ing. Stefan Wegele für seine ständige Hilfsbereitschaft und die Zusammenarbeit mit seinem elektronischen Tool QRailScan für die videobasierte Datenerhebung,
- Dr.-Ing. Uwe Becker für die Möglichkeit der Verwendung des elektronischen Instruments II-Tool und Dr.-Ing. Lisandro Quiroga für seine aktive Unterstützung bei der Entwicklung einer Schnittstellen für die Verbindung von Stellwerk und Fahrsimulator,
- Roger Rieker, Lokführer der SBB, für die Vermittlung von Instrumenten für das Forschungslabor und seine tatkräftige Unterstützung,
- alle Lokführerinnen und Lokführer für ihr Vertrauen und ihre Teilnahme an den Versuchsfahrten auf den Fahrsimulatoren als Probanden,
- Hansjörg Manz, Jan Welte, René Hosse, Patrick Diekhake, Gelmar von Buxdehove und den übrigen wissenschaftlichen Mitarbeitern des Instituts für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik an der Technischen Universität Braunschweig für ihre fachliche Hilfe und Unterstützung bei meinen Aufenthalten in Braunschweig,
- Carsten Hölscher für seinen Support im Zusammenhang mit der Modellierung der Teststrecke auf dem Simulator ZUSI 3,
- Stefan Vogel der Firma ELEMENT P für die Experimente zum Retouchieren von Signalen in Videos am Beispiel der Teststrecke in Obermatt,
- Dr. Harry Groner, Kurt Borter und Nicole Stoller für die wertvolle sprachliche Unterstützung und die Korrekturen der Texte,
- alle Fachleuten und Kollegen in Deutschland und der Schweiz, die mir stets mit vielen Gesprächen, fachtechnischer Unterstützung, Hinweisen und Empfehlungen zur Seite gestanden haben und auf diese Weise einen entscheidenden Betrag zu diesem Projekt beigetragen haben.

Mein spezieller Dank geht an meine Mutter Marianne und an meinen Bruder Rolf, die mich während der Zeit meines Promotionsstudiums unterstützt und mir ein Zuhause geboten haben.

Goldiwil, im April 2014
Jürg Suter

Aus darstellerischen Gründen werden in dieser Arbeit nicht immer beide Geschlechter ausgeschrieben. Wenn z.B. von Lokführern oder Zugverkehrsleitern die Rede ist, sind stets Personen beider Geschlechter gemeint.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	1
Kurzfassung	8
Abstract	9
 1. Einleitung und Problematik	10
1.1 Problemstellung	10
1.2 Der Mensch im technischen Umfeld: Komplexität	11
1.2.1 Erhöhung der Geschwindigkeit	11
1.2.2 Erhöhung der Verkehrsleistung	11
1.3 Die Schnittstellen Mensch-Maschine im Spannungsfeld der Automatisierung	12
1.3.1 Unterschiedliche Automatisierung bei Stellwerken und Triebfahrzeugen	12
1.3.2 Bedienung versus Überwachung	13
1.3.3 Heterogene Entwicklung	13
1.4 Mündliche Kommunikation vor dem Hintergrund der Automatisierung	14
1.4.1 Notwendigkeit der mündlichen Kommunikation im Ereignisfall	14
1.4.2 Kommunikationskompetenz	14
1.4.3 Fazit	15
1.5 Auswirkung menschlicher Arbeitsprozesse auf das System	16
1.5.1 Ereignisorientierte Analyse von Missverständnissen	16
1.5.2 Schwindende Kompetenz und zunehmende Monotonie	16
1.5.3 Bedeutung von Systemkenntnissen	17
1.5.4 Vermischung von Prozessen im Zuge der Automatisierung	17
1.6 Modellierung und Beschreibung	17
1.6.1 Modellierung	17
1.6.2 Petrinetze zur Systembeschreibung	19
1.6.3 Modellierung von Eisenbahnsystemen	19
1.6.4 Verwendung von Daten und Formaten	19
1.6.5 Simulatoren für Mensch-Maschine-Untersuchungen	20
1.6.6 Dynamische Modelle durch Berücksichtigung von Zeitattributen	20
1.7 Ziele der Arbeit	20
1.8 Übersicht	22
 2. Methodische Ansätze	24
2.1 Modell der Situation Awareness (SA)	24
2.1.1 Die vier Dämonen der Situation Awareness	24
2.1.2 Mentale Modelle und Schemata	25
2.1.3 Untersuchung der Situation Awareness	27
2.2 Nutzwertanalyse als Entscheidungshilfe für die Bewertung	27
2.3 Sensitivitätsmodell	28

2.3.1	Grundregeln der Biokybernetik	29
2.3.2	Vorgehen für die Modellierung komplexer Probleme	30
2.3.3	Wirkungsgefüge in grafischer Darstellung	31
2.3.4	Vernetzungsmatrix	32
2.3.5	Grafische Interpretation	33
2.3.6	Vergleich mit System Dynamics	34
2.4	Beschreibungsmittel Petrinetze	35
2.5	Hermeneutischer Zirkel	38
2.6	Experteninterviews	39
2.7	Benennungen und Definitionen	40
2.8	System- und Modellbegriff	42
2.8.1	Reales, kompliziertes und komplexes System	42
2.8.2	Modell und Modellierung	42
2.8.3	Dynamisches Modell in Raum und Zeit	43
2.8.4	Simulation und Simulator	44
2.9	Systembeschreibung	45
2.10	Zusammenfassung und Fazit zu den methodischen Ansätzen	47
2.10.1	Umgang mit komplizierten und komplexen Systemen	49
2.10.2	Eigenschaften von komplizierten und komplexen Problemen	49
3.	Theoretische Analysen	51
3.1	Erkennen von Schwachstellen im Regelwerk (vgl. Kapitel 1: A)	51
3.1.1	Verwechslungsgefahr bei Sammelbefehlen	51
3.1.2	Verwechslungsgefahr bei Gruppensignalen	52
3.1.3	Interpretation subjektiver Wahrnehmung mittels Modellen	54
3.2	Komplexität bei der Untersuchung von Ereignissen (vgl. Kapitel 1: A)	54
3.2.1	Definition des Begriffs des Ereignisses	54
3.2.2	Messbarkeit menschlicher Einflussfaktoren	55
3.2.3	Aufgaben der Schweizerischen Unfalluntersuchungsstelle SUST	55
3.2.4	Analyse von Unfalluntersuchungsberichten	58
3.3	Grenzen und Risiken der Automatisierung (vgl. Kapitel 1: B)	59
3.3.1	Situationsanalyse bei komplexen Problemen	60
3.3.2	Vergleich mit militärischer Entschlussfassung	60
3.3.3	Frage der Risikoakzeptanzgrenzen	61
3.4	Komplexität durch Kommunikation (vgl. Kapitel 1: C)	61
3.4.1	Kommunikation zwischen Lokführer und Zugverkehrsleiter	62
3.4.2	Problem der Mehrsprachigkeit in der Schweiz	62
3.5	Wahrnehmen - Entscheiden - Handeln (vgl. Kapitel 1: D)	63
3.5.1	Beobachtungsaxiome als Grundlage für die Entwicklung von Signalen	64
3.5.2	Zwei verschiedene Typen von Lichtsignalen in der Schweiz	65
3.5.3	Vereinheitlichung der Signalisierung durch ETCS	66
3.5.4	Signalfälle als Sicherheitsindikator	66
3.5.5	Komplexe Problemstellungen am Beispiel der Signalfälle	67

3.6	Wechselbeziehungen bei grossen Infrastrukturprojekten (vgl. Kapitel 1: D)	69
3.6.1	Beispiel einer komplexen Problemstellung im Gotthard-Basistunnel	69
3.6.2	Simulatoren ersetzen die Ausbildung in der Realität	70
3.6.3	Notwendigkeit einer hohen Detailtreue	71
3.7	Mustererfassung	72
3.7.1	Analyse der Vernetzung im Eisenbahnsystem	72
3.7.2	Einflussmatrix für das Eisenbahn-Systemmodell	73
3.7.3	Wirkungsgefüge in grafischer Darstellung	74
3.8	Interpretation und Bewertung	75
3.8.1	Eigenschaften der Systemelemente im Netzwerk	76
3.8.2	Bewertung von Wechselwirkungen	76
3.9	Fazit der theoretischen Analysen	78
4.	Anforderungen an das Simulationsinstrumentarium	79
4.1	Lösungsstrategie	79
4.2	Integrierte Simulationsmodelle	81
4.2.1	Entwicklung einer neuen Middleware	82
4.2.2	Integration der Stellwerke	83
4.3	Einrichtungen des Forschungslabors	85
4.4	Videobasierte Datenerhebung	87
4.4.1	Funktionsweise von QRailScan	88
4.4.2	Mögliche Weiterentwicklung mit Photogrammetrie	90
4.4.3	Anwendung von QRailScan	92
4.5	Daten, Quellen	95
4.5.1	Das Datenformat railML	96
4.5.2	Die railML Schemata	96
4.5.3	Anwendung und Akzeptanz von railML	98
4.6	Die Fahrsimulatoren LOCSIM, FASI und ZUSI 3	98
4.6.1	Der Fahrsimulator LOCSIM der Berner Fachhochschule	98
4.6.2	Der Fahrsimulator FASI der SBB Re 460	99
4.6.3	Der Fahrsimulator ZUSI 3	103
4.7	Vergleichende und empirische Analysen von Simulatoren	104
4.8	Simulator des Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR	105
4.9	Anforderungen an das Simulationsinstrumentarium	105
4.10	Die Teststrecke Emmenmatt/Zollbrück - Obermatt Langnau im Emmental	106
4.11	Modellierung der Eisenbahninfrastruktur	107
4.12	Erkenntnisse über die erforderliche Beschaffenheit der Simulatoren	111
4.13	Fazit über die Untersuchungen im Labor	116

5. Experimentelle Analysen	118
5.1 Fallstudien mit Lokführern auf den Fahrsimulatoren	118
5.1.1 Organisation und Durchführung der Fallstudien	121
5.1.2 Szenario A: Strecke Olten - Brugg	122
5.1.3 Auswertung Szenario A	125
5.1.4 Szenario B: Strecke Baden - Zürich	129
5.1.5 Auswertung Szenario B	131
5.1.6 Fazit zu den Fallstudien	136
5.1.7 Untersuchung der Situation Awareness auf dem Fahrsimulator	137
5.2 Weitere Erkenntnisse und Anwendungsmöglichkeiten	139
5.2.1 Ergonomie.....	139
5.2.2 Betriebliche Lenkung	140
5.2.3 Personalzufriedenheit	142
5.2.4 Gefahrenthemen	143
5.3 Fazit über den Einsatz von Simulatoren	144
5.3.1 Möglichkeiten für das Erheben von Daten	144
5.3.2 Interaktionen Mensch-Maschine	145
5.3.3 Akzeptanz der Simulatoren.....	145
 6. Schlussfolgerungen.....	 147
6.1 Fazit aus den empirischen Ergebnissen.....	147
6.1.1 Begründung eines gesamtheitlichen Systemmodells.....	147
6.1.2 Chancen und Risiken	148
6.2 Beitrag zur Theoriebildung	149
6.3 Rückblick auf die Arbeitsschritte für eine mögliche Modellgestaltung.....	150
6.4 Hypothesentest.....	152
 7. Zusammenfassung und Ausblick	 156
7.1 Künftige Verwendung von Simulatoren zu Untersuchungszwecken	157
7.2 Repräsentativität der Stichproben	159
7.3 Berechnung des Gefährdungspotentials	160
 Verzeichnisse	 163
Abbildungen	163
Tabellen	168
Abkürzungen	170
Glossar	172
Literatur	175
Internetquellen	184
andere Quellen.....	184
Auskunftspersonen	185

Anhang	187
Anhang 1: Funktionsmatrix Stellwerk Obermatt	187
Anhang 2: Nummerierung Schalter und Kontrolllampen am Stellwerk Obermatt	189
Anhang 3: Drehbuch für Szenario A	190
Anhang 4: Beilagen für Szenario A	191
Anhang 5: Drehbuch für Szenario B	192
Anhang 6: Beilagen für Szenario B	193
Anhang 7: Streckentabelle Olten - Brugg - Zürich (1997)	194
Anhang 8: Einwilligung für Datenerhebungen	195
Anhang 9: Fragebogen über demografische Daten	196
Anhang 10: Fragebogen über Ergonomie und Betrieb	197
Anhang 11: Fragebogen über die Anwendung von Simulatoren	200

Kurzfassung

Die Entwicklung der Technik zusammen mit der Zunahme des Verkehrs auf der Schiene führen zu einer stets höheren Komplexität im System der Eisenbahn. Die Automatisierung in der Betriebsführung, der Sicherungsanlagen und der Fahrzeuge bewirkt, dass beim Personal Systemkenntnisse verloren gehen. Deshalb stellt sich heute die Frage, ob dem Ersetzen von jahrelanger Erfahrung durch die Technik gewisse Grenzen gesetzt und welche die Auswirkungen auf das Gesamtsystem sind. Dies betrifft insbesondere Problemstellungen im Zusammenhang mit den Schnittstellen zwischen Menschen und Maschinen. Untersuchungen von betrieblichen und technischen Problemstellungen im System Eisenbahn können heute oft nicht mehr auf linearem Weg durchgeführt werden, weshalb man Simulatoren einsetzt. In dieser Arbeit wird ein Simulationssystem für die Untersuchung von komplexen Problemstellungen konzipiert.

Es gibt momentan keine bekannten Simulationssysteme, die sowohl Lokführer als auch Zugverkehrsleiter gleichzeitig mit einbeziehen. Die Wechselwirkungen zwischen den Systemelementen und deren Tätigkeiten können mit gegenwärtig verfügbaren Simulatoren nicht berücksichtigt werden. Heute können komplexe Situationen oft deshalb nicht genügend tief untersucht werden, weil Beschaffung, Auswahl und Modellierung der notwendigen Daten als zu aufwändig erscheinen.

Das Zusammenführen und Aufbereiten der Daten als Grundlage für Simulationen gestaltet sich auch deshalb schwierig, weil sowohl Infrastruktur als auch Betrieb Veränderungen in stets kürzeren Zeitabständen erfahren. Diese Arbeit konzentriert sich auf die Methoden, wie ein elektronisches Modell für Untersuchungen im komplexen System des Schienenverkehrs aufgebaut werden kann. Es wird dargestellt, welche Daten für eine Systemmodellierung erforderlich sind. Dieses Modell dient als Basis für die Untersuchung von einzelnen Systemelementen und deren Wechselwirkungen. Die Arbeit befasst sich schliesslich mit den Anforderungen an die Visualisierung von Modellen und mit der Anwendung der Instrumente, welche auf den Datenmodellen basieren.

Abstract

Technological developments and increases in rail traffic are resulting in ever more complex rail systems. With the ongoing automation in rail operations, protection systems and vehicles, the human operators are gradually losing their system knowledge. Today, the question therefore arises to what extent technology can replace many years of experience, and how this affects the overall system. This refers particularly to issues concerning human-machine interfaces (HMI). In many cases, operational and technical issues in the rail system can no longer be studied using linear methods, which is why simulators are used instead. This paper presents a simulation system designed to investigate complex issues.

There is currently no widely known simulation system that takes into account both the train driver's and the train dispatcher's perspectives. Currently available simulators are unable to take into account the interactions between these system elements and their activities. Today, complex situations can frequently not be studied in sufficient depth because collecting, selecting and modelling the necessary data would require too much effort.

Merging and preparing data for use in simulations is also difficult because both the rail infrastructure and rail operations are subject to change at ever shorter intervals. This thesis focuses on possible methods of designing and constructing an electronic model for investigations in the complex rail system. It also shows what data are necessary for system modelling. Such a model forms the basis for studying individual system elements and the interactions between them. Finally, the thesis discusses the visualisation requirements for models and the application of various instruments based on the data models.

1. Einleitung und Problematik

Die Automatisierung im Schienenverkehr ermöglicht die Entwicklung hin zu vermehrt rationeller und wirtschaftlicher Betriebsführung. Dies verbessert die Chancen für die Eisenbahnunternehmen, um in einem zunehmend liberalisierten Umfeld des Schienenverkehrs angestrebte Marktanteile zu erreichen. In diesem Kapitel werden ausgewählte Auswirkungen der Automatisierung vorgestellt, welche durch ihre Komplexität auf der Systemebene neue Herausforderungen mit sich bringen. Daraus gehen vier Problematiken im Bereich der menschlichen Faktoren hervor, welche dieser Arbeit zu Grunde liegen und im Einzelnen ausgeführt werden:

- A** Der Mensch im technischen Umfeld: Komplexität,
- B** Der Mensch im Spannungsfeld der Automatisierung,
- C** Mündliche Kommunikation,
- D** Auswirkungen menschlicher Arbeitsprozesse auf das System.

Diese Arbeit versucht aufzuzeigen, wie man das Potential von Modellen und Instrumenten für die Untersuchung von komplexen Problemstellungen nutzen und den daraus entstehenden Anforderungen an die Datenerfassung und die Systemmodellierung gerecht werden kann.

Das Kapitel wird mit der Vorstellung der Arbeitshypothesen und einer Übersicht über die gesamte Arbeit abgerundet.

1.1 Problemstellung

Die Automatisierung ist vor allem in den Bereichen der Betriebsführung und der Fahrerassistenzsysteme zu beobachten. Demnach werden vor allem die Tätigkeiten der Zugverkehrsleiter automatisiert, weshalb örtlich bediente Bahnhöfe und Stellwerke inzwischen selten geworden sind. Das Ersetzen von Lokführern durch Automatisierungstechnik hingegen ist derzeit nur in Ausnahmefällen zu beobachten, obwohl es gemäss dem Stand der Technik bereits heute möglich wäre. Dies hat zur Folge, dass der Einsatz der Zugverkehrsleiter in den letzten Jahren stark reduziert und auf wenige Betriebszentralen konzentriert wurde, während die Lokführer ihren Dienst wie bisher verrichten. Doch auch der Beruf des Lokführers wurde erheblichen Veränderungen unterworfen. Seit der Umsetzung von Bahnreformen arbeiten die Lokführer vermehrt oder ausschliesslich getrennt nach Verkehrsarten (z.B. Güterverkehr, Regionalverkehr, Fernverkehr, S-Bahn). Neue Assistenzsysteme in Triebfahrzeugen und Stellwerken bewirken zudem, dass die Lokführer und Zugverkehrsleiter zunehmend von Bedienern nunmehr zu Überwachern werden. Die traditionellen Berufsbilder werden auch bei der Eisenbahn-Betriebsführung durch die Automatisierung geprägt und verändert. Während dies in den meisten Fällen die Arbeit der Mitarbeitenden vereinfacht und erleichtert, ergeben sich auf Systemebene auch neue Problemstellungen, wie beispielsweise die Auswirkungen von Monotonie am Arbeitsplatz durch Automatisierung und von Verlust an Systemkenntnissen bei den von der Automatisierung betroffenen Mitarbeitern oder das Festlegen von Risikoakzeptanzgrenzen. Die Sicherheitsrelevanz vieler nicht quantitativ messbarer Einflussfaktoren wie Konzentration der Mitarbeiter, Belastbarkeit menschlicher Funktionsträger oder Entscheidungskapazität von Verantwortlichen in Extremfällen scheint im Zuge der Automatisierung anzusteigen. So zum Beispiel gehört die traditionelle Abfertigungsmethode von Zügen nach dem Vier-Augen-Prinzip (Fahrdienstleiter - Lokführer) zur Geschichte.

Somit kann festgestellt werden, dass die technische Entwicklung zu neuen komplexen Problemstellungen im Eisenbahnsystem führt, welche nicht oder nicht vollständig auf linearem oder ma-

thematischem Wege untersucht werden können. Es ist auch zu berücksichtigen, dass der Faktor Mensch im Kontext von Komplexität im System heute im Eisenbahnwesen vergleichsweise noch wenig untersucht wurde. So fällt zum Beispiel bei vielen Unfallberichten auf, dass man menschliches Versagen feststellt, nicht aber weiter auf die Nebenbedingungen der betroffenen Mitarbeitenden eingeht.

In den folgenden Abschnitten werden einige Aspekte aus der Entwicklung der Eisenbahn in Bezug auf die Schnittstellen Mensch-Maschine bei den Berufen Lokführer und Zugverkehrsleiter vorgestellt. Es sind Ausschnitte aus der Geschichte der Eisenbahn, welche sich auf das heutige System auswirken, indem die Schnittstellen als mögliche Ursache von komplexen Fragestellungen in Gegenwart und Zukunft angesehen werden können.

Der Bau der Eisenbahnen im Zuge der Industrialisierung vor über 150 Jahren stellt einen Meilenstein der technischen Entwicklung dar. Das hohe Gewicht der Fahrzeuge und die geringe Reibung zwischen Rad und Schiene führten in Abhängigkeit von immer höheren Geschwindigkeiten zu wesentlich längeren Bremswegen, als man dies von den bisherigen Transportmitteln gewohnt war. Dadurch können die Züge nicht oder meistens nicht auf Sichtdistanz anhalten. Die Eisenbahningenieure sahen sich mit neuen Herausforderungen konfrontiert, entsprechende Sicherungseinrichtungen zu entwickeln. Dazu gehört die Entwicklung von Signalanlagen, die durch die Lokführer unter allen Bedingungen (Witterungsverhältnisse, Licht, Sichtbarkeit usw.) eindeutig wahrgenommen und verstanden werden können. Im weiteren wurden Stellwerke entwickelt, welche bei Fehlbedienungen oder technischem Versagen im Sinne der Sicherheit gegenwirken und damit der Eigenschaft, Züge in der Regel nicht auf Sichtdistanz anhalten zu können, gerecht werden. Die Fahrerlaubnis über Signale soll nur dann erteilt werden können, wenn alle möglichen Gefahren beseitigt sind. (GRAF 1955: 245) Betrachtet man die Entwicklung der Eisenbahn vor dem Hintergrund der Sicherheits- und Triebfahrzeugtechnik in den letzten 150 Jahren, können die Beobachtungen in den folgenden Abschnitten festgehalten werden.

1.2 Der Mensch im technischen Umfeld: Komplexität

1.2.1 Erhöhung der Geschwindigkeit

Die mittlere Reise- bzw. Transportgeschwindigkeit ist bisher erheblich angestiegen, was sich besonders auf Isochronenkarten deutlich nachvollziehen lässt. Mit der Entwicklung der Eisenbahn hat sich beispielsweise auf der Gotthard-Strecke diese Geschwindigkeit um das Dreifache erhöht, wodurch die regionale Entwicklung der an der Strecke befindlichen Orte stark beeinflusst wurde. (SUTER, 2005: 25) Desweiteren beträgt heute in der Schweiz die Höchstgeschwindigkeit von Güterzügen 120 km/h, jene von Reisezügen 160 km/h auf dem konventionellen Schienennetz und 200 km/h auf Hochgeschwindigkeitsstrecken mit Führerstandssignalisierung. Auf einigen europäischen Hochgeschwindigkeitsstrecken fahren die fahrplanmässigen Züge mit Geschwindigkeiten von über 300 km/h. Die Geschwindigkeit von Zügen muss vor dem Hintergrund der kinetischen Energie E_k betrachtet werden: $E_k = \frac{1}{2} mv^2$ (m = Masse, v = Geschwindigkeit in km/h). Demnach verlängert sich der Bremsweg mit der Geschwindigkeit nicht linear, sondern quadratisch. Diese Tatsache wirkt sich stark auf die Anforderungen bei der Entwicklung von Eisenbahnsicherungstechnik aus.

1.2.2 Erhöhung der Verkehrsleistung

Die Zugsdichte auf dem europäischen Eisenbahnnetz entwickelt sich ebenfalls sehr stark. Zum Beispiel waren im Jahr 1970 auf dem schweizerischen Bahnnetz 10 625 Millionen Personen-

kilometer zu verzeichnen, im Jahr 2011 wurden mit 20 956 Millionen fast die doppelten Personenkilometer gezählt. Ein noch stärkeres Wachstum zeigt die Statistik im Güter-Transitverkehr: Im Jahr 1970 zählte man 3 229 Millionen Tonnenkilometer, im Jahr 2011 waren es bereits 7 085 Millionen Tonnenkilometer. (LITRA 2013: 14ff) Die in Abbildung 1 und 2 dargestellten Entwicklungen der Verkehrsleistungen müssen auch vor dem Hintergrund der Infrastruktur betrachtet werden. Während das Strassennetz stark ausgebaut wurde, hat sich die Länge des Schienennetzes nur unwesentlich verändert. Die Verkehrszunahme erforderte auch die technische Entwicklung der Sicherungsanlagen. Moderne Zugleit- und Zugbeeinflussungssysteme ersetzen heute personelle Tätigkeiten, wodurch die Kapazität der Eisenbahninfrastruktur erhöht werden konnte.

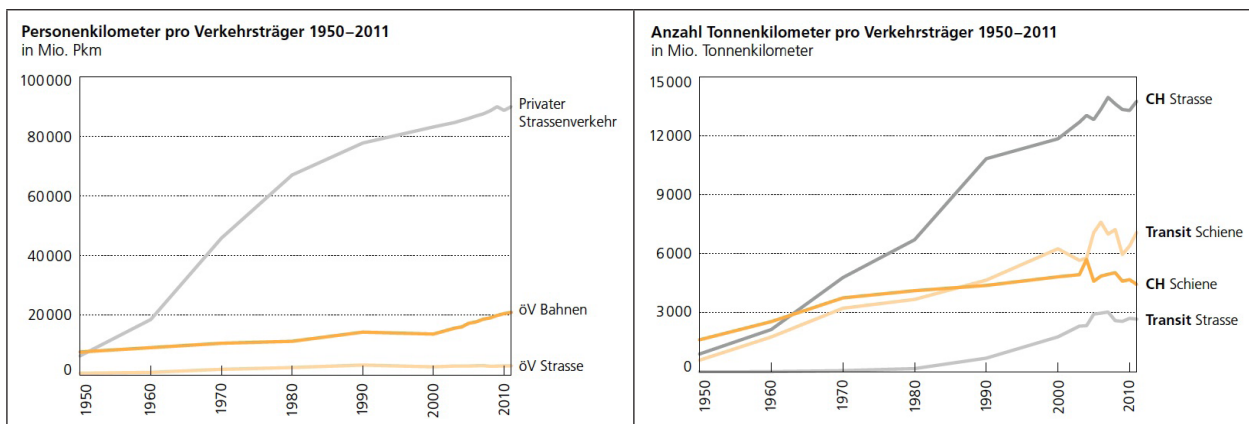


Abbildung 1 und 2: Entwicklung des Verkehrs in der Schweiz, gemessen in Personenkilometern (Pkm) und Tonnenkilometern (tkm). Der Anstieg mit der Verkehrsleistung ist mit dem Ausbau der entsprechenden Infrastruktur in Beziehung zu stellen. (LITRA 2013: 14, 19)

Heute machen sich bei der Verdichtung des Zugverkehrs bereits Grenzen bemerkbar. Eine weitere Möglichkeit, die Kapazität zu erhöhen, besteht in der Einführung einer integrierten Echtzeit-Produktionsplanung als „vielversprechender Ansatz, um die Leistungsfähigkeit von Eisenbahnsystemen effektiv und effizient zu steigern“. (LÜTHI 2009: vii-viii);

1.3 Die Schnittstellen Mensch-Maschine im Spannungsfeld der Automatisierung

1.3.1 Unterschiedliche Automatisierung bei Stellwerken und Triebfahrzeugen

Die Stellwerke lassen sich im Zuge der Entwicklung in vier Typen einteilen: mechanische Stellwerke, elektromechanische Stellwerke, relaisgesteuerte Stellwerke und elektronische Stellwerke. Als Grundlage für das Einstellen von Fahrstrassen dient die Methode der Verschlussstabelle. Sie ist maschinenlesbar und wird mit geringfügigen Anpassungen und Ergänzungen auch heute noch bei modernen Stellwerken angewendet. In Abbildung 3 ist als Beispiel die Verschlussstabelle des ehemaligen elektromechanischen Stellwerks vom Typ VES des Bahnhofs Emmenmatt mit fünf Gleisen dargestellt. Die Tabelle zeigt auch für einen relativ kleinen Bahnhof einen grossen Umfang an Feldelementen, woraus der Schluss gezogen werden kann, dass Stellwerke generell über eine hohe Bedienungskomplexität verfügen. Die Verschlussstabelle stellt auch für die Modellierung der Stellwerklogik eine wichtige Grundlage dar.

Die Automatisierung in der Betriebsführung zeigt zwei grundsätzliche Ausprägungen: Einerseits werden manuelle Bedienungsvorgänge an Stellwerken vor Ort durch die Leittechnik ersetzt und die Zugverkehrsleiter in Betriebszentralen zusammengefasst. In Zukunft gibt es das traditionelle Berufsbild des Stellwerkbediensteten bzw. Fahrdienstleiters an Ortsstellwerken in Bahnhöfen nicht mehr. Andererseits sieht die Automatisierung bei Fahrzeugen bzw. Triebfahrzeugen wie folgt aus:

[illegible]

1.3.2 Bedienung versus Überwachung

In diesem Zusammenhang arbeiten beispielsweise die SBB mit der Hochschule für Angewandte Psychologie (Fachhochschule Nordwestschweiz) zusammen, um das System „Mensch - Technik - Organisation“ vor dem Hintergrund der Automatisierung und im Hinblick auf eine mögliche Optimierung der Sicherheit und Systemzuverlässigkeit zu gestalten. (FISCHER 2010: 2-3).

Die Entwicklung der Signal- und Sicherungstechnik verlief in den einzelnen Ländern unterschiedlich. Ein grenzüberschreitender Verkehr von Triebfahrzeugen war in den ersten 130 Jahren der Eisenbahn die Ausnahme. Die 1922 gegründete Dachorganisation Union Internationale des Chemins de Fer (UIC) hat die Vereinheitlichung vor allem für den internationalen Austausch von Wagen bewirkt (z.B. Zug- und Stosseinrichtungen, Kupplung, Bremsen). Das European Train Control System (ETCS) soll die gegenwärtig zahlreichen unterschiedlichen Zugbeeinflussungssysteme in Europa vereinheitlichen. In den letzten Jahrzehnten wurden die Anstrengungen zur Vereinheit-

lichung der Infrastruktur von der Entwicklung systemübergreifend einsetzbarer Triebfahrzeuge eingeholt. Diese Triebfahrzeuge können mit unterschiedlichen Traktionssystemen (z.B. Gleich- und Wechselstrom) und Zugbeeinflussungssystemen betrieben werden. Wenn die Lokführer dadurch auch grenzüberschreitend im Einsatz sind, bringt dies die Anforderung mit, dass sie die länderspezifischen Vorschriften beherrschen und die Signale kennen.

1.4 Mündliche Kommunikation vor dem Hintergrund der Automatisierung

Vor dem Hintergrund der Automatisierung muss man der Frage nachgehen, welche Auswirkungen auf Systemebene der Verlust von persönlichen Kontakten von Zugverkehrsleiter und Lokführer haben kann. Bei traditioneller Betriebsführung standen die beiden Berufskategorien in intensivem persönlichen Kontakt, was die Unternehmenskultur auf dieser Ebene prägte. Dadurch wurde ein gegenseitiges Verständnis der beiden Funktionen überhaupt erst möglich, was die Berufserfahrung und die Systemkenntnisse der Mitarbeiter förderte. Hans WÄGLI, Autor zahlreicher Fachbücher wie „Schienennetz Schweiz“ (WÄGLI 2010a) stellt aus seiner jahrzehntelangen Erfahrung als Eisenbahner fest: *„Jeder dieser menschlichen Kontakte vom Hand aufheben oder mit dem Licht anzünden oder ablöschen, je nach dem, Führerstandsbeleuchtung ein- und ausschalten, jeder solche Kontakt ist nicht Höflichkeit oder Freundlichkeit, [...] das ist nicht das, sondern das auch immer „ich bin ok, du bist ok“. Und aus dieser Bestätigung, du bist gut unterwegs, jawohl, du hast es richtig gesehen, aus dieser gegenseitigen Zeichengabe, tut man sich auch bestärken. Das gibt ein Gefühl von Sicherheit, der Lokomotivführer hat Einzelhaft auf seinem Führerstand, er ist so nicht alleine.“* (mündliche Stellungnahme am 13.01.2014) Aus dieser Aussage geht hervor, dass mit dem durch die Automatisierung der Stellwerke resultierenden Verlust von direkter Zusammenarbeit offensichtlich eine kommunikative Lücke entstanden ist.

1.4.1 Notwendigkeit der mündlichen Kommunikation im Ereignisfall

Im Zuge der Automatisierung wird im Rahmen der Eisenbahnbetriebsführung nicht mehr häufig mündlich kommuniziert. Obwohl die sicherheitsrelevante Bedeutung der mündlichen Kommunikation bei Ausfall einer oder mehreren technischen Komponenten der Sicherungsanlage oder beim unerwarteten Eintreten ausserordentlicher Ereignisse offensichtlich erscheint, ist die Notwendigkeit solcher Eingriffe dank hoher technischer Verfügbarkeit sowie umfangreicher Sicherheitsmassnahmen selten geworden. An dieser Stelle wird eine Problematik erkennbar, welcher in dieser Arbeit mehrmals behandelt wird. Die Fähigkeit des betroffenen Personals, im Ereignisfall und bei Ausfall von technischen Komponenten sowie bei unsicheren Situationen zeitgerecht und folgerichtig zu reagieren, erfordert kostenintensives Erhalten von Fachkompetenzen. Da diese Kenntnisse und Erfahrungen in der Praxis nur noch sehr selten zur Anwendung kommen, stellt sich sofort die Frage nach Vertretbarkeit und Verhältnismässigkeit der Massnahmen zur lückenlosen Aufrechterhaltung dieser Kompetenzen. Mirjam SCHWAGER (2013: 12) stellt in ihrer Bachelorarbeit über die Risiken der Automatisierung für die Zusammenarbeit von Lokführer und Zugverkehrsleiter fest, dass „über die Rolle der mündlichen Kommunikation im Schienenverkehr noch praktisch keine Literatur vorhanden ist. Im Gegensatz dazu findet man im Bereich der Luftfahrt sehr viele Studien.“ Weiter zeigt sie auf, dass als Grundvoraussetzungen für ein gelingendes Gespräch einerseits genügend grosses gegenseitiges Verständnis, andererseits Einhalten der Kommunikationsregeln erforderlich sind.

1.4.2 Kommunikationskompetenz

Zur Erhöhung der Kommunikationskompetenz und zur Anregung einer kritischen Reflexion über das eigene Kommunikationsverhalten sind Trainings und Simulatorübungen generell sehr wichtig.

(SCHWAGER 2013: 19) Walter Kobelt, Leiter der Schweizerischen Unfalluntersuchungsstelle für Bahnen und Schiffe SUST-BS erklärt aus seiner Erfahrung, dass die Mehrsprachigkeit der Schweiz besondere Herausforderungen biete, die sich im Falle von Störungen und in der Nähe der Sprachgrenzen problematisch auswirken können. Diese Aussage wird durch den Lokführer Mike VON AESCH (mündliche Stellungnahme vom 09.01.2104) unterstützt, indem er, angesprochen auf die Risiken im Zusammenhang mit der automatisierten Betriebsführung, diese in erster Linie im Bereich der Kommunikation an den Sprachgrenzen sieht. Häufen würden sich Kommunikationsprobleme auch im Bereich von Arbeitsstellen und bei Rangierlokführern, da Sprechregeln oft missachtet würden. (SCHWAGER 2013: 26-27) Diese Aussage kann auch mit den Ergebnissen aus dem Studium und der Auswertung von insgesamt 14 Unfalluntersuchungsberichten nachvollzogen werden. Dabei wurde als häufigste Ursache von relevanten Problemen, zu wenig oder gänzlich fehlende Kommunikation sowie Missverständnisse auf Grund von fehlendem Zurücklesen oder von Sprachschwierigkeiten festgestellt. Auch diese Feststellung bestätigt VON AESCH (mündliche Stellungnahme vom 09.01.2104) aus seiner Erfahrung, da die grundsätzlich bestehende Gefahr von Missverständnissen bei schlechter Funk- oder Telefonverbindung in der Praxis dadurch verstärkt werde, indem sich viele Lokführer und Zugverkehrsleiter nicht an das vorgeschriebene Gegenlesen halten würden. Aus der Arbeit von Mirjam SCHWAGER (2013) geht auch hervor, dass der fehlende persönliche Kontakt zwischen Lokführer und Zugverkehrsleiter als negativ empfunden wird. Dies birgt ein Potential für Missverständnisse bei der Kommunikation, indem durch den Verlust der persönlichen Kontakte am Arbeitsplatz ein gewisses gegenseitiges Verständnis für die beiden Berufe heute fehlt. Interviews mit Vertretern des betroffenen Personals haben ergeben, dass sowohl Lokführer (LF) als auch Zugverkehrsleiter (ZVL) die mündliche Kommunikation als sehr wichtig wahrnehmen. „Speziell die Diskrepanzen bei der Anforderung an die Kommunikation des Gegenübers geben einen Hinweis, dass das gegenseitige Verständnis von LF und ZVL nicht immer genügend gross ist. Auch bei dem Punkt ‚Erlebte Missverständnisse‘ zeigen die Aussagen, dass zu wenig oder zu viel Informationen zu Missverständnissen führen können, auf, dass nicht allen klar ist, welches Informationsbedürfnis die Gegenseite hat.“ (SCHWAGER 2013: 34) Aus den Erkenntnissen dieser Arbeit hat SCHWAGER (2013: 42) folgende Praxisempfehlungen hergeleitet:

- Lokführer, Zugverkehrsleiter sowie Rangier- und Baudienstpersonal mittels kritischen Beispielen im Bereich der Kommunikation sensibilisieren,
- ein Monitoring über die Anwendung der Kommunikationsregeln führen,
- spezifische Weiterbildungsmassnahmen durchführen,
- die Zugverkehrsleiter über den Umgang mit fremdsprachigen Lokführern sensibilisieren,
- den Lokführern und Zugverkehrsleitern die Gelegenheit geben, die jeweils anderen Berufstätigkeiten besser kennen zu lernen und damit ein gegenseitiges Verständnis zu fördern.

1.4.3 Fazit

Aus den dargestellten Aspekten ist zu entnehmen, dass sich die mündliche Kommunikation im Zuge der technischen Entwicklung der Betriebsführung stark entwickelt hat. Die Notwendigkeit und Gewohnheit direkter Gespräche zwischen Lokführer und Zugverkehrsleiter ist durch den Einsatz moderner Technik hinfällig geworden. Während heute im täglichen Betrieb mündliche Kommunikation kaum mehr praktiziert wird, kann sich bei plötzlich auftretender Ereignisbewältigung jedes Missverständnis bei Gesprächen fatal auswirken.

Wie am Beispiel der untersuchten Ereignisse hergeleitet wurde, kann die Kommunikation in Szenarien schnell zu komplexen Problemstellungen führen.

1.5 Auswirkung menschlicher Arbeitsprozesse auf das System

Zusammenfassend kann man feststellen, dass die steigende Reise- bzw. Transportgeschwindigkeit, die steigende Verkehrsdichte, der Ausbau der Verkehrsinfrastruktur und die Kapazitätssteigerungen in einem engen Zusammenhang stehen. Frederic VESTER kommt zur Erkenntnis, dass der Aus- und Neubau der Verkehrsinfrastruktur in manchen Fällen bis zu 30 Prozent mehr Neuverkehr zur Konsequenz hatte. An der Richtigkeit dieser Aussage wird inzwischen nicht mehr gezweifelt, konnte man zum Beispiel auf den beiden schweizer Eisenbahn-Neubaustrecken Mattstetten - Rothrist im Jahre 2004 und Frutigen - Raron - Visp durch den Lötschberg-Basistunnel im Jahre 2007 ähnliche Feststellungen verzeichnen. Das deutsche Umweltbundesamt stützt sich in seinem Bericht über die Determinanten der Verkehrsentstehung auf Theorien, welche aussagen, „dass eine Verbesserung der Infrastruktur zusätzlichen Verkehr zur Folge hat, soweit damit eine Verbesserung der Erreichbarkeit (Senkung der Reisezeiten und damit der Transportkosten) einhergeht.“ (VERRON/HUCKESTEIN/PENN-BRESSEL/RÖTHKE/BÖLKE/HÜLSMANN, 2005: 46). Demnach kann festgestellt werden, dass die technische Entwicklung im Bereich der Fahrzeuge und der Infrastruktur selbst zusätzlichen Verkehr generiert. Damit stossen die Verkehrsträger an ihre Leistungsgrenzen, was erneute Ausbaumassnahmen erfordert, welche wiederum zusätzlichen Verkehr generieren. (VESTER 1999: 26) Durch die steigenden Kosten, verursacht durch Entwicklungs- und Ausbaumassnahmen, geraten die Eisenbahnverkehrs- und Infrastrukturunternehmen zusätzlich unter wirtschaftlichen Druck. Dies wiederum wirkt hin auf weitere Rationalisierungsmassnahmen, unter anderem im Bereich der Betriebsführung. Diese Entwicklung leistet auch einen wesentlichen Betrag an die Veränderungen der Arbeitsbedingungen von Lokführern und Zugverkehrsleitern.

1.5.1 Ereignisorientierte Analyse von Missverständnissen

Während man für die Untersuchung und Entwicklung von technischen Komponenten heute gut gerüstet ist, gestalten sich Problemstellungen an den Schnittstellen zwischen Mensch und Maschine oft als ausgesprochen komplex und unübersichtlich. Vielfach können sicherheitsrelevante Erkenntnisse in diesem Bereich erst retrospektiv, das heisst auf der Basis und Analyse von Ereignissen gewonnen werden. So zum Beispiel konnte eine Verwechslungsgefahr im Zusammenhang mit den Schweizerischen Fahrdienstvorschriften erst nach einer Häufung von gefährlichen Ereignissen erkannt werden: Der Befehl an den Lokführer für die Vorbeifahrt am Halt zeigenden Hauptsignal schreibt automatisch auch „Fahrt auf Sicht“ bis zum nächsten Hauptsignal vor. Umgekehrt gilt der Befehl an den Lokführer für „Fahrt auf Sicht“ selbstverständlich nicht für die Vorbeifahrt am Halt zeigenden Hauptsignal. Es hat sich jedoch gezeigt, dass dies zum Teil von Lokführern verwechselt wird. Die Untersuchung zu diesem Fall wird in den Abschnitten 3.1 sowie 5.1 zusammen mit weiteren Ergebnissen aus empirischen Studien mit Simulatoren vorgestellt.

1.5.2 Schwindende Kompetenz und zunehmende Monotonie durch Automatisierung

Weitere Begleiterscheinungen der Automatisierung befinden sich im Arbeitsumfeld der Lokführer und Zugverkehrsleiter. Fahrerassistenz- und Zugleitsysteme nehmen den Bedienern von Triebfahrzeugen bzw. von Stellwerken manuelle Tätigkeiten ab und schaffen ihnen Freiraum für neue Überwachungsaufgaben. Dabei unterscheiden sich die Randbedingungen der Lokführer und Zugverkehrsleiter. Während die betrieblichen Prozesse automatisiert werden, und das Personal in Betriebszentralen zusammengefasst wird, arbeiten die Lokführer die meiste Zeit allein in den Führerständen der Fahrzeuge. In der alltäglichen Arbeitsroutine sind ehemals wichtige Fertigkeiten wie Fahrgefühl und Orts- bzw. Systemkenntnisse nicht mehr erforderlich. Dies kann auch dazu führen, dass verlorene Kompetenzen des Personals im Falle des Versagens technischer Elemente für das augenblickliche Treffen von Entscheidungen und Handlungen fehlen.

Zudem begünstigt der Wandel vom Bediener zum Überwacher, verbunden mit hoher Verfügbarkeit der Sicherungs- und Leittechnik, das Aufkommen von Monotonie bei der Arbeit, was wiederum zum Stressfaktor für das betroffene Personal werden kann. Durch die Anwendung des fail-safe-Prinzips bei Sicherungsanlagen greifen technische Rückfallebenen ein, weshalb sich in einem solchen Fall in der Regel nur betriebliche, nicht jedoch sicherheitsrelevante Auswirkungen bemerkbar machen. Aus der Praxis sind jedoch Situationen bekannt, bei denen eine einzige Fehlhandlung zu Gefährdungen oder sogar zu einem Unfall geführt hat.

1.5.3 Bedeutung von Systemkenntnissen

Es liegt in der Verantwortung der Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) und der Infrastrukturbetreiber (ISB), dass das eigene Personal über die für den Störungs- oder Notfall erforderlichen Systemkenntnisse verfügt. Dabei handelt es sich um Kenntnisse und Fertigkeiten, die in der Praxis kaum oder gar nicht mehr angewendet werden können. Im Abschnitt 3.6 dieser Arbeit wird versucht, am Beispiel des neuen Gotthard-Basistunnels auf oben genannte Problematik einzugehen.

1.5.4 Vermischung von Prozessen im Zuge der Automatisierung

Es ist offensichtlich, dass die Automatisierung von Stellwerken eines Eisenbahnnetzes nicht flächendeckend gleichzeitig erfolgen kann. Auf dem schweizerischen Schienennetz sind zur Zeit noch alle vier oben beschriebenen Bauarten von Stellwerken vorhanden (vgl. Abschnitt 1.3.1), wobei die mechanischen Anlagen inzwischen fast alle ersetzt wurden. Elektromechanische Apparate hingegen sind noch einige in Betrieb. Bei der Betriebsführung wurden bereits flächendeckend Prozesse eingeführt, die eigentlich auf modernen Anlagen und ferngesteuerten Stellwerken basieren. Als Beispiel dazu sind die Abfahrprozesse zu nennen, welche in den alleinigen Verantwortungsbereich des Lokführers verlegt wurden, da auf Grund der Automatisierung vor Ort kein Zugverkehrsleiter mehr Dienst tut. Diese Regelung wurde aber auch auf Bahnhöfen eingeführt, deren Stellwerke einen automatischen oder ferngesteuerten Betrieb noch nicht zulassen und weiterhin mit Personal vor Ort bedient werden. Der zuvor auf zwei Mitarbeiter verteilte Abfahrprozess (vier-Augen-Prinzip) obliegt nun allein dem Lokführer. Sollte er irrtümlich bei Halt zeigendem Signal abfahren, sind die Interventionsmöglichkeiten für den Zugverkehrsleiter beschränkt.

1.6 Modellierung und Beschreibung

Für das Verstehen von komplexen Problemstellungen, welche sich nicht auf mathematischem bzw. analytischem Wege beschreiben lassen, werden Modelle verschiedener Ausprägungen angewendet.

1.6.1 Modellierung

Ein Modell ist eine Abbildung der Realität in einem bestimmten Massstab oder einer bestimmten Auflösung. Massstab und Auflösung bewirken in der Abbildung eine Abstraktion, welche es dem Anwender des Modells ermöglicht, einen Sachverhalt zu erkennen, zu verstehen oder zu begreifen. Die Modellierung beschreibt die Gesamtheit aller Tätigkeiten, um einzelne Objekte, Daten, Elemente usw. in eine Form zu überführen, welche der Abbildung der Realität im gewünschten Massstab oder der gewünschten Auflösung entspricht. GLINZ (2005: 3ff) zeigt auf, dass Modelle aus einer Menge von Individuen und Attributen aufgebaut sind und ordnet den Modellen drei Hauptmerkmale zu:

- das Abbildungsmerkmal: jedes Modell ist Abbild oder Vorbild,
- das Verkürzungsmerkmal: jedes Modell abstrahiert,
- das Pragmatikmerkmal: jedes Modell wird in Hinblick auf einen Verwendungszweck geschaffen.

Die Abbildung 4 zeigt, dass ein Modell vor allem sprachlich dargestellt werden muss. Ergänzend zu dieser Darstellung ist festzuhalten, dass aus Sicht der Automatisierungstechnik mehrere Arten von Beschreibungsmitteln zur Anwendung kommen können. SCHNIEDER (1999: 126-128) unterscheidet aus pragmatischer Sicht natürliche, mathematische, implementierungsorientierte, strukturorientierte, zustandsorientierte und methodenorientierte Beschreibungsmittel. GLINZ (2005: 16ff) zeigt auf, dass die Ontologie dabei die Basis für ein gemeinsames Verständnis bildet, welches den Wissensaustausch überhaupt erst möglich macht. In der Notation definiert und erklärt man die Verwendung von Zeichen und Symbolen. Operationen in Modellen lassen Schlüsse zu, wie sich das Original unter den gleichen Operationen verändert hätte. Die oben dargestellten grundsätzlichen Elemente von Modellen können je nach Verwendungszweck anders bezeichnet werden.

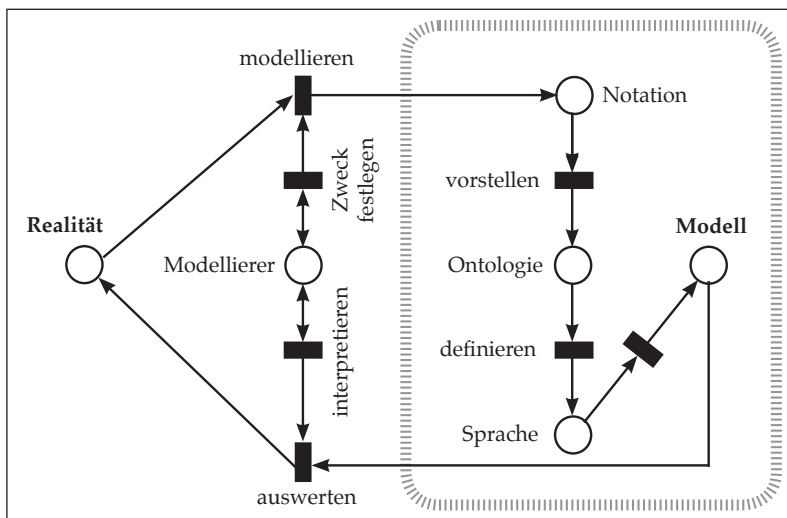


Abbildung 4: Zusammenhang von Modell, Realität und Sprache. (Darstellung nach Angaben in GLINZ 2005: 19)

MÜLLER (1998: 103) zeigt die grundlegende Eigenschaft eines Modells aus der Automatisierungstechnik auf, nach welcher ein zielgerichteter Prozess mit einem Steuerungs- und einem Objektmodell abgebildet werden kann. Für eisenbahntechnische Systeme eignet sich die objektorientierte Modellierung. Sie „geht vom Ansatz aus, die reale Welt in ein System von diskreten Objekten abzubilden, welche sowohl Datenstrukturen als auch Verhaltensweisen in sich vereinen. Die in der Realität vorkommenden Objekte und Komponenten werden dabei so detailliert wie nötig in das anzufertigende Modell überführt. Wenn möglich werden für die Objektnamen die umgangssprachlichen Bezeichnungen verwendet.“ (HÜRLIMANN 2001: 7) In den Abschnitten 6.3 und 6.4 versucht diese Arbeit, auf die Frage nach der Notwendigkeit und nach dem Detaillierungsgrad eines Modells näher einzugehen.

Eine hier angemessen erscheinende Definition nach MÜLLER (1999: 22) lautet: „Ein System ist eine Menge von geordneten Elementen, die durch Beziehungen verknüpft sind. Durch die Verknüpfung der Elemente erhalten sie spezielle Eigenschaften. Aus der Menge der Beziehungen zwischen den Elementen entsteht eine Struktur. Durch die Organisation eines Systems entwickelt sich eine Ordnung.“ Bei vernetzten Betrachtungen muss geklärt werden, ob es sich um ein komplexes System, ein Teilsystem oder um Einzelmechanismen handelt.

1.6.2 Petrinetze zur Systembeschreibung

Um einen Sachverhalt zu modellieren, muss er selbst geeignet umschrieben und allgemein verständlich gemacht werden können. SCHNIEDER (1999: 46) zeigt dabei eine für die Automatisierungstechnik geeignete Vorgehensweise auf: „Um überhaupt einen Sachverhalt ausdrücken zu können, bedarf es grundsätzlich eines am besten verständlichen Beschreibungsmittels. Im Grunde müssen dafür Beschreibungsmittel in Form eines rekursiven Prozesses mit Methode, Werkzeug, Ziel usw. entwickelt werden. [...] [Petrinetze] erlauben eine Vereinheitlichung der Modellbildung und liefern bereits ein umfassendes Meta-Repräsentationskonzept für die gebräuchlichen Beschreibungsmittel der Automatisierungstechnik.“

Nachdem „Petrinetze schon vor gut 30 Jahren mit dem Begriff von Mensch-Maschine-Modellen in Verbindung gebracht werden“ (MÖHLENBRINK 2010: 44), versucht diese Arbeit, u.a. Petrinetze auch als Beschreibungsmittel von Prozessen an den Schnittstellen zwischen Zugverkehrsleiter und Stellwerk zu verwenden. MÖHLENBRINK stellt in seiner Arbeit fest, dass die Motivation der ersten Zielsetzungen nicht darin lag, empirische Verhaltensdaten für den Erkenntnisprozess heranzuziehen. Er wendet farbige Petrinetze für Mensch-Maschine-Systeme im Flugverkehr an. Die Wahl und Anwendung des Beschreibungsmittels stellt einen grundlegenden Arbeitsschritt für das Erstellen eines Modells dar.

1.6.3 Modellierung von Eisenbahnsystemen

Zum Stand der Technik bezüglich Modellierung von Eisenbahnsystemen kann zusammenfassend festgestellt werden, dass die verfügbare Menge von Daten im Wachstum begriffen ist und dass zu den diesbezüglichen Herausforderungen der Zukunft nicht mehr nur Generieren und Beschaffen sondern viel mehr Auswählen und Verarbeiten der Daten zählen. Im Bereich der Daten über Eisenbahninfrastruktur und -betrieb hat das Format railML hohe Beachtung erlangt, welches den Datenaustausch wesentlich vereinfachen und standardisieren kann. (GERKE/BLEIDISSLER/LODEMAN/LUTTENBERGER 2012: 49) Die Beschaffenheit der zahlreichen vorhandenen Eisenbahnsimulatoren ist insgesamt als heterogen zu bezeichnen; bei diesen Instrumenten sind heute noch kaum Standards erkennbar. Insbesondere fehlen Standards für die Modellierung der Stellwerklogik, zudem können den erhobenen Daten oft keine zeitlichen Attribute zugewiesen werden, weshalb die Anwendung der darauf basierenden Modelle nur zum entsprechenden Zeitpunkt, nicht jedoch in einem Zeitintervall möglich ist. Schliesslich ist festzuhalten, dass Fahr- und Stellwerksimulatoren der Eisenbahn heute in erster Linie für die Ausbildung und nur ausnahmsweise für die Forschung und Untersuchung von komplexen Problemstellungen eingesetzt werden.

1.6.4 Verwendung von Daten und Formaten

Nachdem die Verfügbarkeit von Daten über die Eisenbahninfrastruktur und den Betrieb in den letzten 20 Jahren zunehmend einfacher geworden ist, steigt der Aufwand für die Aktualisierung und Aufbereitung der Daten laufend an. Die Vielfalt an elektronischen Systemen, Instrumenten, Datenformaten und Speichermedien kann dazu führen, dass der Aufwand, die vorhandenen Daten in die für die Modellierung erforderliche Form zu bringen, grösser ist als sie neu zu erheben. Die Datenpflege stellt bei den Infrastruktur- und Eisenbahnverkehrsunternehmen einen steigenden Kostenfaktor dar, weshalb sie sich Datenlieferungen an Externe entsprechend entschädigen lassen. Seit dem Jahre 2002 befasst sich die Initiative railML zusammen mit Projektpartnern aus Industrie, Forschung und Wirtschaft mit der Schaffung eines einheitlichen Datenformats auf XML-Basis, um den Datenaustausch im Eisenbahnwesen wesentlich zu vereinfachen. Der nachfolgende Bericht zeigt, dass die Initiative railML bereits wesentliche Erfolge erreicht hat: „Durch die Zusammenarbeit und bessere Koordination unter den Bahnorganisationen könnten erhebliche Einsparungen

realisiert werden. In diesem Sinne bot die Union Internationale des Chemins de fer (UIC) den Akteuren an, als Plattform zur Koordinierung ihrer Arbeiten zu fungieren. Ferner einigte man sich auf die Nutzung und Weiterentwicklung von railML als Basis für den Datenaustausch, da dieses offene Format bereits von vielen Bahnen und ETCS-Lieferanten verwendet wird.“ (KOLMORGEN 2013: 2)

1.6.5 Simulatoren für Mensch-Maschine-Untersuchungen

Für die Untersuchung der Kritikalität, Anforderung und Sensitivitäten von Vorgängen der Kommunikation sowie für die Ausbildung eignen sich Simulatoren. Diese Erkenntnis soll in der vorliegenden Arbeit bei der Untersuchung der Anwendung von Simulatoren reflektiert werden.

Ein Simulator ist ein Modell, mit welchem sich die Realität in dynamischer Weise nachbilden lässt. Wie das Modell weist auch der Simulator einen bestimmten Abstraktionsgrad auf, welcher mit Hinblick auf den Verwendungszweck im Voraus festgelegt wird. Im Bereich der Eisenbahn gibt es heute zahlreiche Fahr- und Stellwerksimulatoren, welche vorwiegend oder ausschliesslich zum Zweck der Ausbildung von Personal eingesetzt werden. Integrierte Simulatoren, bei welchen sowohl der Lokführer als auch der Zugverkehrsleiter gleichzeitig an der Simulation beteiligt sind, bilden heute noch die Ausnahme. Dies ist insofern erstaunlich, dass die beiden genannten Berufe in der Realität über die Leittechnik, Signale, Kommunikationsmittel und Regelwerke zusammenarbeiten. Aus Ereignissen und Unfällen gehen oft Fragen mit komplexen Ursachen-Wirkungs-Zusammenhängen hervor, für deren Untersuchung der Einsatz von integrierten Simulatoren sinnvoll erscheint. Hinsichtlich Modellierung sei an dieser Stelle festgehalten, dass sich im Bereich der Eisenbahnfahrsimulatoren gewisse Instrumente auf dem Markt durchzusetzen scheinen, während im Bereich der Stellwerklogik noch keinerlei Standardisierung erkennbar ist.

1.6.6 Dynamische Modelle durch Berücksichtigung von Zeitattributen

Jedes Modell bildet die Realität in der Regel zu einem bestimmten Zeitpunkt ab, typischerweise zu jenem, an welchem die entsprechenden Daten erhoben wurden. Es wurde bereits festgestellt, dass heute im Hinblick auf die Modellierung von Eisenbahnsystemen vor allem die Datenaktualisierung - weniger die Datenbeschaffung - mit besonderen Herausforderungen verbunden ist. Dementsprechend verursacht auch die Aktualisierung der Modelle grossen Aufwand. So zum Beispiel entsteht bei einem Fahrsimulator, für welchen ein 3D-Geländemodell mit mikroskopischer Visualisierung einer Eisenbahnstrecke erstellt wurde, viel Aufwand für die Datenaktualisierung. Es besteht der Anspruch, dass der Lokführer die im Simulator abgebildete Infrastruktur stets im aktuellen Zustand antrifft. Eine solche Anforderung ist gemäss heutigem Stand der Technik kaum realisierbar, geschweige denn bezahlbar. Dabei muss man sich vorstellen, dass die Eisenbahn-Infrastruktur auf Grund von Bau- und Instandhaltungsmassnahmen täglichen Veränderungen unterworfen ist. Da die Eisenbahn auf Systemebene zahlreiche Wechselwirkungen zu anderen Elementen aufweist, wären Modelle wünschenswert, welche die Realität nicht nur zu einem festgelegten Zeitpunkt, sondern auch in einem Zeitintervall abbilden. Mit einem solchen Modell können Hypothesen über geplante Infrastrukturen getestet und Erfahrungen aus der Vergangenheit integriert werden. Im Rahmen dieser Arbeit werden Überlegungen angestellt, den Daten über einzelne Objekte ein zeitliches Attribut zuzuordnen, welches die Aktualisierung der Modelle in einem Zeitintervall ermöglichen soll.

1.7 Ziele der Arbeit

In einem ersten Schritt wird versucht, komplexe Problemstellungen im Bereich der Eisenbahn-Betriebsführung zu erklären, welche nicht oder nur teilweise auf mathematischem und analytischem

Wege untersucht werden können. Die Arbeit befasst sich mit geeigneten Beschreibungsmitteln für eine systematische Modellierung mit dem Ziel, integrierte Simulatoren für die realitätsnahe Darstellung von Arbeitsplätzen der Lokführer und Zugverkehrsleiter aufzubauen, welche Untersuchungen an den Schnittstellen Mensch-Maschine erlauben. Die in der Theorie entwickelten Lösungsansätze werden in einem eigens für diese Arbeit aufgebauten Forschungslabor plausibilisiert und auf ihre Machbarkeit sowie Tauglichkeit hinsichtlich Anwendung überprüft. Dazu werden auch moderne Simulatoren eingesetzt, um der Frage nachzugehen, ob und wie der für die Untersuchungen ausgewählter Problemstellungen geeignete Abstraktionsgrad definiert werden kann. Die Durchführung von Fallstudien auf den Simulationsmodellen bringen neue Erkenntnisse über die Modellierung und über den Einsatz von Simulatoren zu Untersuchungszwecken. In diesem Sinne versucht die Arbeit anhand von konkreten Beispielen aufzuzeigen, wie bestehende Lücken in der Anwendung des fail-safe-Prinzips erkannt und bewertet werden können.

Das Hauptziel dieser Arbeit besteht daraus, die Gestaltung eines integrierten Eisenbahn-Systemmodells mit Fokus auf die Schnittstellen Mensch-Maschine von Lokführer und Zugverkehrsleiter zu beschreiben und zu erklären, sowie den Nutzen solcher Modelle unter Verwendung in Simulatoren zur Untersuchung komplexer Problemstellungen aufzuzeigen. (vgl. Abbildung 5)

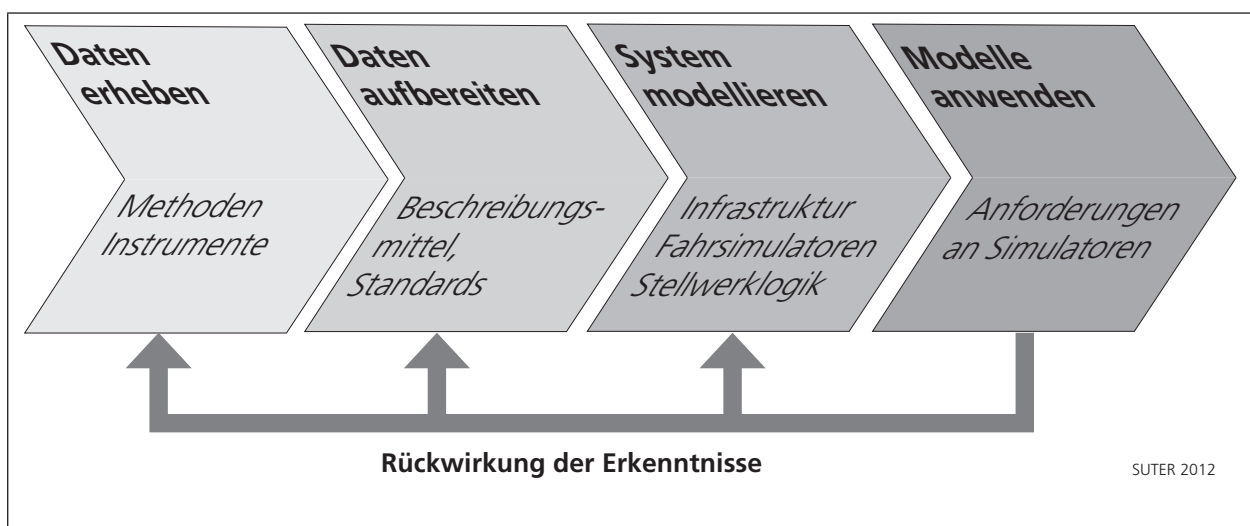


Abbildung 5: Prozess der wesentlichen Arbeitsschritte, welche den Untersuchungen dieser Arbeit zu Grunde liegen. Die Datenerhebung, Datenaufbereitung, Modellierung und Anwendung der Modelle bilden ein Wirkungsgefüge. Aus der Anwendung fließen Erkenntnisse auf die vorangehenden Arbeitsschritte zurück.

Aus diesem Hauptziel resultieren folgende Arbeitsschritte:

- *Datenerhebung*: Anwendung und Erklärung einer neuen, videobasierten Methode für das Erheben von Infrastrukturdaten mit dem Ziel, die Effizienz bei der Datenerhebung für die Modellierung zu steigern,
- *Datenaufbereitung*: Anwendung geeigneter Formate und Beschreibungsmittel unter Berücksichtigung von Erkenntnissen bisheriger Studien,
- *Modellierung*: Untersuchung einer modular anwendbaren Software zur Integration von Fahr- und Stellwerksimulatoren sowie Untersuchungen von Lösungsansätzen für die Standardisierung der Modellierung der Stellwerklogik,
- *Anwendung von Simulationsmodellen*: Aufzeigen von grundlegenden Anforderungen an Simulatoren im Eisenbahnbetrieb bezüglich ihres Abstraktionsgrades und in Hinblick auf den Zweck ihrer Anwendung bei Fallstudien mittels Versuchen mit Probanden.

Die auf der Basis von Fallstudien mit Lokführern generierten Aussagen dienen im Rahmen dieser Arbeit als Nachweis für die Anwendbarkeit von Simulationsmodellen zu Untersuchungszwecken und dürfen mangels statistischer Aufarbeitung nicht als repräsentativ für die Sicherheit der Eisenbahnen in der Schweiz angesehen werden.

Basierend auf obgenannten Zielsetzungen wurden folgende Arbeitshypothesen definiert:

Hypothese 1: Komplexe Problemstellungen aus der Eisenbahnbetriebsführung lassen sich vor allem mit Simulatoren und empirischem Methoden untersuchen. Komplexität drückt sich dadurch aus, dass sich die Probleme nicht oder nur teilweise auf mathematisch-analytischem Weg beschreiben lassen.

Hypothese 2: Die Möglichkeit, Modelle in Simulatoren anwenden zu können, erlaubt die Untersuchung von Wechselwirkungen zwischen dem Eisenbahnsystem und Umsystemen. Ferner können mit verhältnismässig geringem Aufwand weitere Annahmen plausibilisiert und Hypothesen untersucht werden.

Hypothese 3: Es besteht die Nachfrage nach einer Anwendung von Modellen, mit welchen die Auswirkungen von Einflüssen in Abhängigkeit zu zeitlichen Veränderungen untersucht werden können. Dies bildet eine wichtige Voraussetzung, Erfahrungen aus der Vergangenheit in die Zukunft projizieren zu können. Solche Modelle können dann hergestellt werden, wenn die Objektdaten über entsprechende Zeitattribute verfügen.

Hypothese 4: Die Visualisierung der Umwelt bzw. des Geländes für den Simulator ist nicht nur Selbstzweck. Vielmehr bildet das Geländemodell eine wichtige Grundlage für interdisziplinäre Untersuchungen. Die Ausgestaltung des Geländemodells bestimmt im Wesentlichen den Abstraktionsgrad des Simulators.

Hypothese 5: Es ist möglich, eine gesamtheitliche Datenbasis als Grundlage für die Modellierung von Eisenbahnsystemen oder -teilsystemen zu schaffen. Dabei sind bestehende oder im Aufbau begriffene Standardisierungen in Betracht zu ziehen, um eine vielseitige Verwendung der Daten zu ermöglichen.

1.8 Übersicht

Nach der Einführung und Vorstellung der Problematik in Kapitel 1 widmet sich das *Kapitel 2* den methodischen Ansätzen. Dabei wird anhand von Untersuchungen aufgezeigt, wie die Situation Awareness gemessen werden kann. Ferner werden ein Sensitivitätsmodell sowie Erkenntnisse aus Studien vorgestellt, welche dieser Arbeit zu Grunde liegen. Das Kapitel wird schliesslich mit Definitionen der Begriffe des Systems und des Modells beendet.

Das *Kapitel 3* befasst sich mit theoretischen Analysen, welche im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden. Dabei wird auf das Thema der Komplexität im Eisenbahnsystem eingegangen. Mittels Aufzeigen von Beispielfällen, bei denen die in der heutigen Praxis angewandten Methoden viele Fragen offen lassen, werden Erkenntnisse hergeleitet und vorgestellt. Das Eisenbahnsystem wird aus systemischer Sichtweise analysiert, um die Rollen der einzelnen Systemelemente zu verstehen und daraus Sensitivitäten bezüglich Eingriffen darzulegen. Dies ermöglicht wichtige Rückschlüsse für die Gestaltung eines Eisenbahn-Systemmodells, woraus Anforderungen und Lösungsansätze für Wissenschaft und Praxis abgeleitet werden.

Im *Kapitel 4* werden die Anforderungen an das Simulationsinstrumentarium vorgestellt. Dabei wird aufgezeigt, wie die für diese Arbeit benötigten Daten realisiert werden, und welche Instrumente dabei zu Anwendung kommen. Ein neu entwickeltes Instrument für die videobasierte

Datenerhebung bildet eine theoretische Grundlage dieser Arbeit. Die verwendeten Simulatoren werden erklärt und teilweise verglichen. Im Weiteren wird das für Experimente aufgebaute Forschungslabor vorgestellt.

Ferner wird in diesem Kapitel beschrieben, was vor dem Hintergrund dieser Arbeit unter dem Dynamischen Eisenbahn System Modell zu verstehen ist. Dabei werden Untersuchungen auf der Teststrecke anhand der Modellierung der Testumgebung mit Hilfe von zwei Simulationsprogrammen und einem Stellwerk vorgestellt.

In *Kapitel 5* umfasst den Einsatz von Simulatoren für die Untersuchung von komplexen Problemstellungen am Beispiel der Fallstudien mit Lokführerinnen und Lokführern, welche im Forschungslabor durchgeführt wurden. Hier werden die Ergebnisse vorgestellt, und die Erkenntnisse aufgezeigt, welche auf die vorangehenden Arbeitsschritte der Modellierung, der Datenaufbereitung und Datenerhebung zurück wirken.

Die gesamten Ergebnisse werden schliesslich in *Kapitel 6* diskutiert. Sie werden dabei den Arbeitshypothesen gegenüber gestellt.

Im *Kapitel 7* werden die gesamten Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst. Schliesslich werden die offenen Fragen in einem Ausblick auf weitere Fragestellungen dargestellt.

Der *Anhang* enthält die relevanten Dokumente aus den Untersuchungen und Experimenten wie ein Funktionsmatrix des Versuchsstellwerks Obermatt sowie Drehbücher, Beilagen und Fragebogen der Fallstudien auf dem Fahrsimulator. Die *Beilage* besteht aus einem Plan der Stellwerkmodellierung Obermatt unter Verwendung von Petrinetzen und dem elektronischen Instrument „ Π -Tool“.

Die Abbildung 6 stellt die Struktur der Arbeit mit den wichtigsten Informationsflüssen grafisch dar.

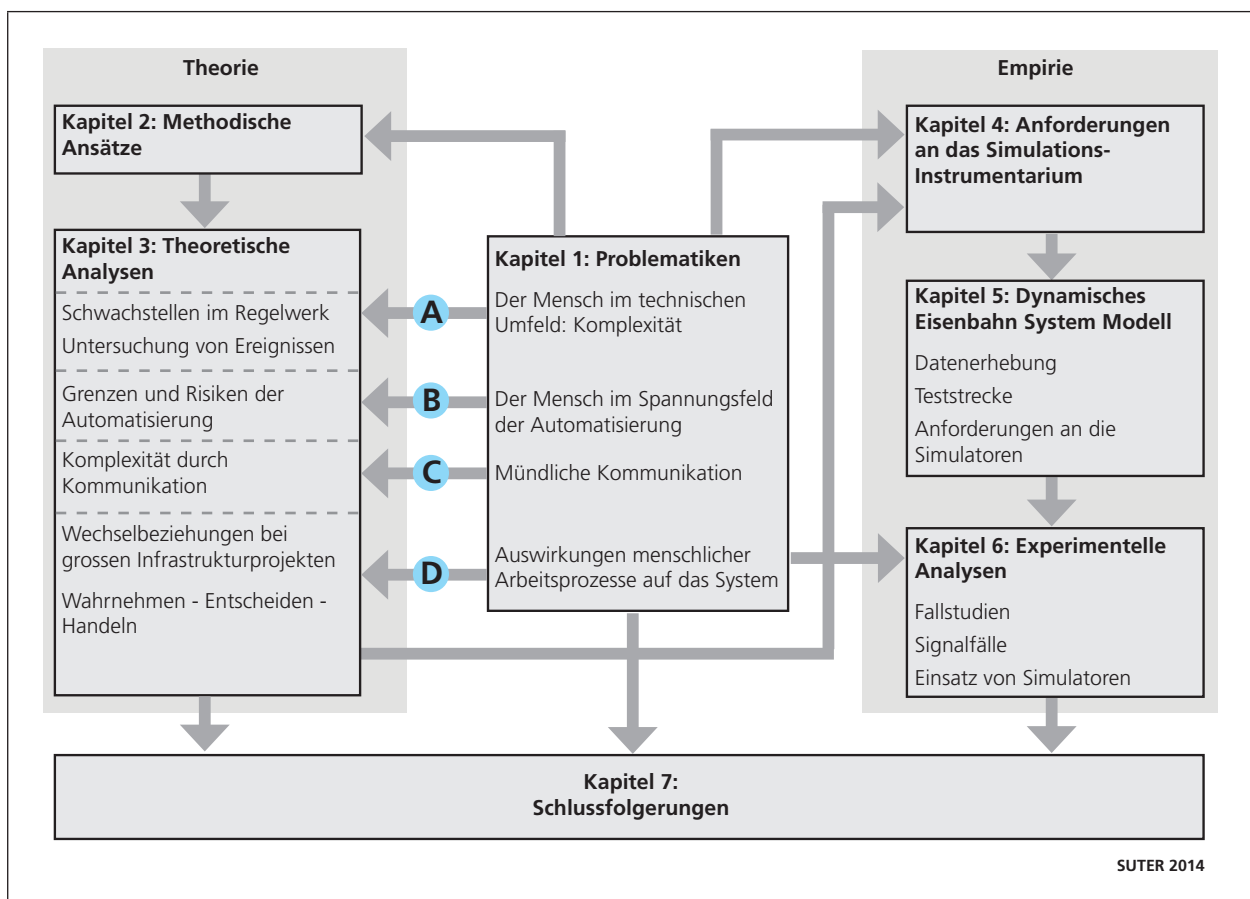


Abbildung 6: Grafische Übersicht der Arbeit.

2. Methodische Ansätze

Für die Untersuchung von komplexen Systemen ist es erforderlich, die Wirkungszusammenhänge und Sensitivitäten zu verstehen. Dieses Kapitel zeigt die Vorgehensweise auf, welche zu den Ergebnissen dieser Arbeit führen. Es wird insbesondere dargestellt, wie das Modellkonzept der Situation Awareness für Untersuchungen auf dem Fahrsimulator angewendet wurde. Es folgen weitere methodische Konzepte, wie die Nutzwertanalyse als Entscheidungshilfe, das Sensitivitätenmodell, die Verwendung von Petrinetzen als Beschreibungsmittel und der hermeneutische Zirkel für die Entwicklung von wissenschaftlichen Aussagen. Viele Fragen dieser Arbeit wurden auch auf qualitativem Weg mittels Experteninterview geklärt, welche in diesem Kapitel in einer Übersicht dargestellt werden. Schliesslich werden die Begriffe des Systems und des Modells für die Verwendung in dieser Arbeit definiert.

2.1 Modell der Situation Awareness (SA)

HAMMERL (2011: 15) stellt fest, dass die Mensch-Maschine-Interaktion, Informationsverarbeitung und ihre Auswirkungen, vertreten durch eine ingenieurpsychologische und sicherheitstechnische Herangehensweise im Eisenbahnwesen bisher wenig studiert wurden. Das Modell des Situationsbewusstseins, welches besonders unter dem englischen Begriff der *Situation Awareness* bekannt ist, stösst vor allem im Flugverkehr seit Jahren auf grosse Beachtung. Die Eisenbahn gehört in dieser Hinsicht zur „vergessenen Branche“ (STOLLER 2013: 1).

Das Situation Awareness Modell gliedert sich in die drei Ebenen Wahrnehmung, Verständnis, Vorhersage und wird losgelöst von Entscheidung und Handlung betrachtet. Nachdem die Wahrnehmung auf der ersten Ebene über die Sinnesorgane erfolgt, wird sie auf der Ebene des Verständnisses in den richtigen Kontext gestellt. Voraussetzung für das Ergebnis der dritten Ebene der Voraussage sind Systemkenntnisse und Antizipation. (STOLLER, 2013: 1ff) Letztere Begriffe werden uns in dieser Arbeit noch vermehrt beschäftigen. Wird die zweite oder dritte Ebene nicht erreicht, spricht man von einem sogenannten Situation Awareness Fehler (SA-Fehler).

Studien haben gezeigt, dass die häufigsten Fehler auf der ersten Ebene durch nicht beobachtete Informationen auftreten, welche durch eingeschränkte Aufmerksamkeit, Ablenkung, Arbeitsbelastung und weitere Stressfaktoren verursacht werden können. Dies bestätigt auch die Untersuchung von 19 ausgewählten Unfallberichten (STOLLER 2013: 6), wovon neun entscheidende Fehler der ersten Ebene zuzuordnen sind.

2.1.1 Die vier Dämonen der Situation Awareness

Anhand vier sogenannter SA-Dämonen zeigt STOLLER (2013: 6) mögliche Kategorien und Ursachen auf. Lokführer und Zugverkehrsleiter verrichten ihre Arbeit, indem Sie gleichzeitig mehrere Überwachungstätigkeiten wahrnehmen:

- Beim ersten Dämon, dem *Tunnelblick*, wird die Aufmerksamkeit überwiegend auf die vermeintlich wichtigste Informationsquelle (zum Beispiel eine Störungsanzeige auf einem Monitor) gelegt, während andere wichtige Informationsquellen nicht wahrgenommen werden.
- Der zweite Dämon, die *SA-Stressoren*, beschreibt physische und psychische Störgrössen wie Zeitdruck, Leistungsdruck, Wärme/Kälte, Lärm usw, die Gedächtnis und Organisationsfähigkeit und damit die Aufnahmefähigkeit beeinträchtigen.

- Der dritte Dämon, das *Out-of-the-loop Syndrom* entsteht vor dem Hintergrund der Automatisierung. Die Tatsache, dass sich die Berufsbilder von Zugverkehrsleiter und Lokführer weg vom Bediener und hin zum Überwacher wandeln, lässt die Mitarbeiter nicht mehr aktiv an den Arbeitsschritten teilnehmen. Dies kann zu übermässigem Vertrauen in die Technik und zur unbewussten Überzeugung führen, dass die Verantwortung gleich mit automatisiert wurde. Dadurch wird die Aufnahmefähigkeit ebenfalls eingeschränkt. Auch im Zusammenhang mit diesem Dämon und dem Ausfall von technischen Komponenten ordnet Stoller den Systemkenntnissen eine grosse Bedeutung zu.
- Der vierte Dämon, die *Gedächtnisfalle*, betrifft das Arbeitsgedächtnis, welches laufend wahrgenommene Informationen zusammenführen und zwischenspeichern muss. Da gespeicherte und nicht verarbeitete Informationen innerhalb von 20 bis 30 Sekunden zerfallen, werden organisatorische oder technische Hilfsmittel (z.B. Checklisten, Warnschilder usw.) angewendet. Trotzdem müssen die einzelnen Informationen im Gedächtnis gespeichert werden, was mittels einer Bildung von Haufen (engl. Chunks) geschieht.

Stoller verweist dabei auf das Signalsystem L, bei welchem eine Anordnung von sechs oder mehr Lichtquellen wahrzunehmen ist. Der Lokführer muss nicht jede Lichtquelle einzeln lesen sondern nimmt den Signalbegriff als Kombination von Lichtquellen wahr. (STOLLER 2013: 6ff) Das Erkennen und Interpretieren von Signalen jedoch gehört für jeden Lokführer zur Routine. Schwieriger wird die Speicherung von Informationen, welche sehr selten auftreten und gleichzeitig eine hohe Sicherheitsrelevanz aufweisen. STOLLER (2013: 9ff) zeigt im Weiteren auf, dass das Verstehen der Informationen und Voraussagen der Handlungen über mentale Modelle geschieht, welche im Langzeitgedächtnis abgelegt sind. Sie basieren auf Erfahrungen und bilden die Grundlage zu verstehen, wie etwas funktioniert.

2.1.2 Mentale Modelle und Schemata

Bei der Wahrnehmung wird auf das passende mentale Modell zugegriffen, welches wiederum von den auf Erfahrung basierenden Schemata beeinflusst wird. Das Ergebnis bestimmt das Verständnis und die Vorhersage. In vereinfachter Form werden die mentalen Modelle Schemata genannt, welche entsprechend den wahrgenommenen Informationen ausgewählt werden. Schnell wechselnde Umweltbedingungen, zu welchen die mentalen Modelle nicht mehr passen, können Probleme verursachen. Stoller erwähnt dazu in ihrer Arbeit ein sehr wichtiges Beispiel im grenzüberschreitenden Eisenbahnverkehr: Währenddem in der Schweiz die Signale in der Regel links des Gleises aufgestellt sind, stehen sie in Deutschland auf der rechten Seite. Auch der Aufbau der Führerstände ist zwischen den beiden Ländern seitenverkehrt. Im Zuge der Interoperabilität und des freien Netzzugangs auf den europäischen Eisenbahnstrecken sind sowohl Lokführer als auch Triebfahrzeuge zunehmend über die Landesgrenzen hinweg im Einsatz. Die Notwendigkeit der kurzfristigen Anpassung der mentalen Modelle beim Überfahren der Landesgrenze kann dazu führen, dass unter Einfluss des vorherrschenden, aber in der neuen Umgebung falschen mentalen Modells das falsche Signal beachtet wird. (STOLLER 2013: 9-10) Am 27. Februar 2013 ist es in Basel Badischer Bahnhof zu einer Kollision zwischen dem Lokzug 99311 der SBB und dem Güterzug 44621 der DB gekommen, nach dem der Lokführer des Lokzugs ein Halt zeigendes Signal überfahren und dabei in die Fahrstrasse des gleichzeitig parallel fahrenden Güterzugs eingedrungen ist. Im Untersuchungsbericht ist folgende Aussage nachzulesen: „Der Lokführer von Zug 99311 hatte gegenüber der [Schweizerischen Unfalluntersuchungsstelle] SUST ausgesagt, dass er das „Fahrt 60“ (Sig. Hp 2 mit Hg 60 km/h) signalisierende Signal N141 für Güterzug 44621 mit dem „Halt“ (Sig. Hp 00) signalisierenden Signal N12 verwechselt habe, da bei den SBB die Signale in der Regel links vom jeweiligen Gleis stehen würden. Auf dem Netz der DB allerdings stehen die Signale rechts vom jeweiligen Gleis.“ (SCHWEIZERISCHE UNFALLUNTERSUCHUNGSSTELLE SUST 2013: 3)

Dieses Beispiel unterstützt die oben genannte Vermutung, indem bei hoher Vielfalt der Umweltbedingungen das falsche mentale Modell („Signale stehen links vom Gleis“) ausgewählt werden kann, was demnach zu falschem Verständnis und falscher Vorhersage führt (vgl. Abbildung 7). Anschliessend ist der Weg über den Entschluss zur (Fehl-)handlung nur noch kurz.

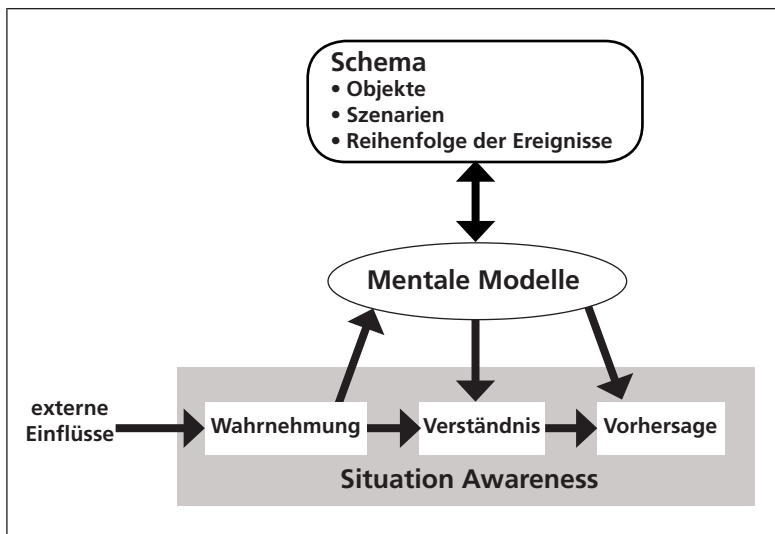


Abbildung 7: Die Zusammenhänge von Situation Awareness, mentalen Modellen und Schemata. (Darstellung nach ENDSLEY/BOLTÉ/JONES 2003. In: STOLLER 2013: 9)

Über die Einwirkung von Stressfaktoren auf das Personal zeigt STOLLER (2013: 13) auf, dass Stress aus einer Kombination von unangenehmen Gefühlen, körperlicher Erregung und vereinfachtem Handeln besteht. Bezüglich der sicherheitskritischen Tätigkeiten von Zugverkehrsleitern und Lokführern können Routineaufgaben auch unter Einfluss von Stress relativ gut ausgeführt werden. Erst bei komplexen Aufgaben besteht eine Neigung zu unkontrolliertem, riskanten Verhalten. YERKES/DODSON (1908: 479ff) beschrieben in ihrem Gesetz, dass die menschliche Leistungsfähigkeit bezüglich Wissen, Verstehen und Denken im Wesentlichen von einem sogenannten „Aktivierungsniveau“ abhängt. Demnach kann die menschliche Belastung durch Stress auch als Gleichgewichtsmethapher aufgefasst werden: Nicht nur eine zu hohe, sondern auch eine zu geringe Aktivierung stellen in diesem Sinne Ungleichgewichte dar, welche sich jeweils negativ auf die kognitive Leistungsfähigkeit auswirken.

Auf der linken Seite der Yerkes-Dodson-Kurve in Abbildung 8 lässt sich das oben beschriebene Out-of-the-loop Syndrom nachvollziehen, welches vor allem vor dem Hintergrund der Automatisierung bei Überwachungstätigkeiten zum Risiko werden kann. Es erscheint schwierig, bei monotoner Arbeit die potentielle Leistungsfähigkeit so hoch zu halten, dass bei einem selten eintreffenden Ereignis korrekt reagiert werden kann.

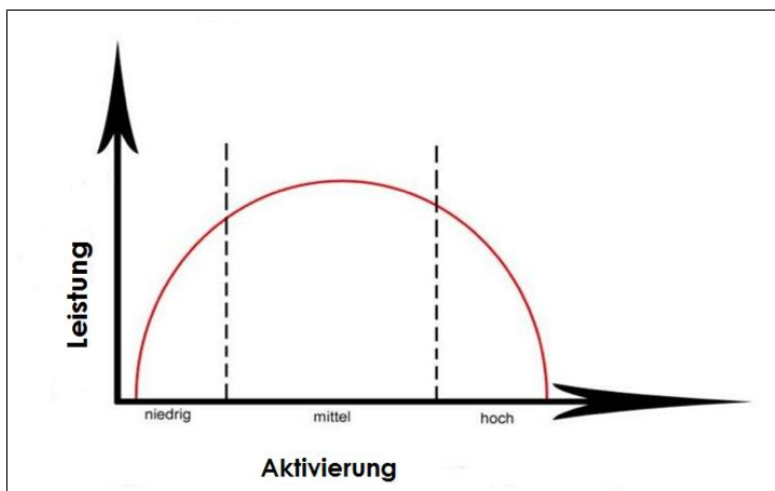


Abbildung 8: Die Yerkes-Dodson-Kurve zeigt, dass sich Stress nicht von Anfang an schädlich auf die Leistung auswirkt. (YERKES/DODSON 1908: 479ff. In: STOLLER 2013: 13)

2.1.3 Untersuchung der Situation Awareness

„Faktoren wie erhöhte mentale Belastung, fehlendes Systemwissen, Monotonie oder schlecht sichtbare Signalisierung erschweren den Aufbau einer adäquaten Situation Awareness. Diese gehört jedoch zu den elementaren Voraussetzungen einer sicheren Zugsführung und sollte, ähnlich wie in der Aviatik, auch im Bahnverkehr die nötige Beachtung erhalten. Dazu braucht es weitere wissenschaftliche Untersuchungen von Faktoren, welche die Situation Awareness von Lokführern positiv oder negativ beeinflussen - und entsprechende sicherheitsförderliche Massnahmen für Mensch, Technik und Organisation. Unerlässlich dafür ist eine gute Zusammenarbeit von Fachleuten aus den Bereichen Psychologie, Sicherheit, Ergonomie, Arbeits- und Ingenieurwissenschaften, um die Arbeitssysteme derart zu gestalten, dass sie die menschlichen Fähigkeiten als Stärken nutzen und damit zu einer erhöhten Sicherheit im Bahnverkehr beitragen.“ (STOLLER 2013: 39)

In den Arbeitswissenschaften wird Belastung definiert als die Menge der objektiven Arbeitsparameter, während Beanspruchung das daraus resultierende, subjektive menschliche Empfinden darstellt. (HAMMERL/FELDMANN 2009: 316)

Die Untersuchungen der in Abbildung 9 aufgezeigten Einflussfaktoren verfolgen das Ziel, Grundlagen für Verbesserungen zu schaffen oder vorgesehene Sicherheitsmassnahmen zu plausibilisieren. Sie können kaum eins zu eins im Eisenbahnbetrieb durchgeführt werden. Die betrieblichen Einschränkungen und Risiken, verbunden mit den daraus resultierenden Kosten erlauben die erforderlichen Experimente in der Realität nur zu einem kleinen Teil. Unter Berücksichtigung dieser Tatsache überwiegen die Vorteile beim Einsatz von Simulatoren, welche mitunter die einzige Möglichkeit darstellen, tiefgreifende Sensitivitätsanalysen an den Schnittstellen Mensch-Maschine im Eisenbahnbetrieb durchzuführen.

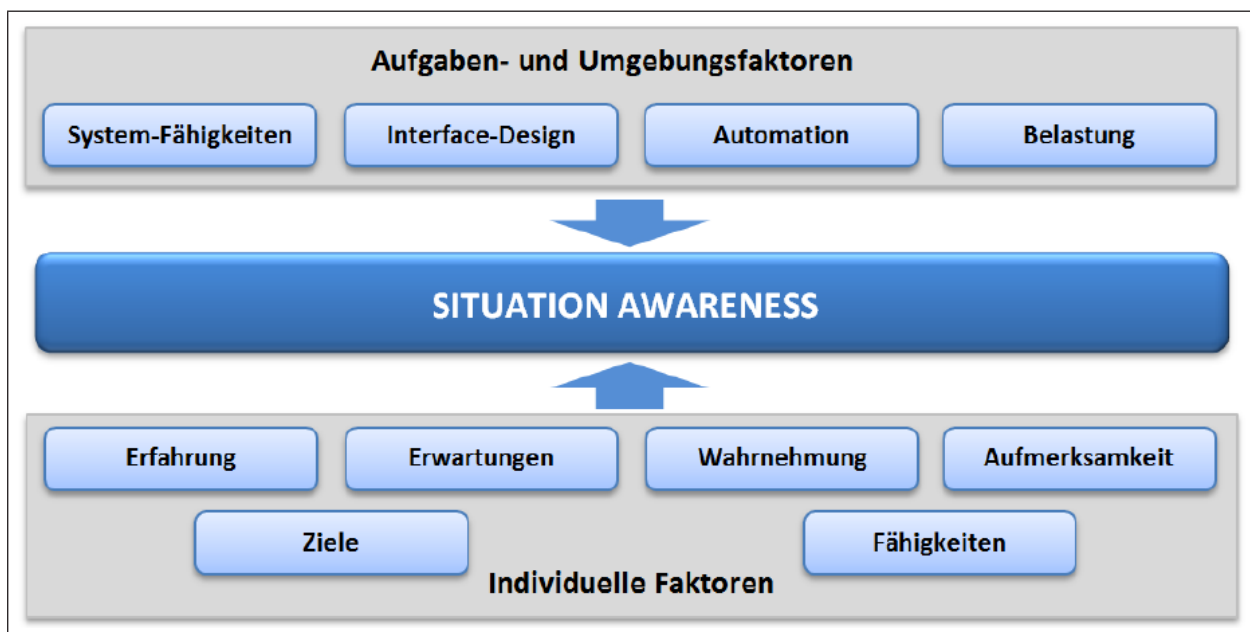


Abbildung 9: Faktoren nach Endsley, welche die Situation Awareness beeinflussen und für Verbesserungsmassnahmen in Betracht gezogen werden können. (Quelle: STOLLER 2013: 37 nach ENDSLEY 1995: 34-35)

2.2 Nutzwertanalyse als Entscheidungshilfe für die Bewertung

Bei der Entwicklung und Untersuchung von Lösungsansätzen stehen oft mehrere Alternativen zur Auswahl, deren Vor- und Nachteile nicht immer quantifizierbar sind. In solchen Fällen erscheint die *Nutzwertanalyse* sinnvoll, welche im Gebiet der Betriebswirtschaft ein häufig verwendetes Instrument darstellt. Dass die Nutzwertanalyse durchaus auch im Bereich des Verkehrs ihre Anwen-

dung findet, zeigt die Studie von RIEDER (2005: 94): Jedem Indikator wird eine Gewichtung beigegeben, wobei die Punktzahlen und Gewichtungen zu einem Nutzwert zusammengefasst werden können (Aggregation). Für die vorliegende Arbeit werden die Beurteilungskriterien in Gruppen und Untergruppen aufgeteilt und einzeln gewichtet. Weil die Faktoren nicht berechnet, sondern auf Grund empirischer Daten geschätzt werden, wird die Nutzwertfunktion faktisch willkürlich festgelegt. Daher gilt die Nutzwertanalyse als Hilfsmittel zur Entscheidungsfindung und darf nicht mit dem Sensitivitätsmodell bzw. der Vernetzungsmatrix in Verbindung gebracht werden. Als Beispiel zur Erläuterung dieses Verfahrens wird in Tabelle 1 die Bewertung von drei verschiedenen Ursachen von Signalfällen für die Auswahl zu Untersuchungszwecken aufgeführt. (SUTER 2007: 29)

Bewertungskriterien	Gewichtung		LOCSIM (Video)		FASI (3D-Modell)		ZUSI 3 (3D-Modell)	
	%	%	Bewertung	Punkte	Bewertung	Punkte	Bewertung	Punkte
Import von Infrastrukturdaten	30%							
Datenimport vorgesehen bzw. prioritär		30%	3	0.27	1	0.09	5	0.45
Berücksichtigung von railML		50%	1	0.15	1	0.15	1	0.15
Handhabung des Instruments (Modellierung)		20%	2	0.12	5	0.30	4	0.24
Aufwand für die Modellierung	20%							
Infrastruktur		40%	5	0.40	4	0.32	4	0.32
Landschaft		30%	6	0.36	3	0.18	5	0.30
Freiheit der Modellierung (Objekte)		30%	4	0.24	4	0.24	5	0.30
Visualisierung des Geländes	15%							
Gesamteindruck und Wahrnehmung		40%	4	0.24	4	0.24	5	0.30
Detaillierung und Auflösung		40%	6	0.36	3	0.18	5	0.30
Berücksichtigung von Umweltfaktoren		20%	2	0.06	4	0.12	4	0.12
Anwendbarkeit (Möglichkeiten für Nutzung)	35%							
Gleisbenützung		20%	3	0.21	6	0.42	6	0.42
Signale		20%	6	0.42	6	0.42	6	0.42
Stellwerklogik		40%	5	0.70	1	0.14	5	0.70
Ein- und Ausgänge für Umsysteme		20%	4	0.28	3	0.21	4	0.28
Total Punkte				3.81		3.01		4.30

SUTER 2013

Tabelle 1: Beispiel für die Bewertung dreier Ursachenkategorien mittels Nutzwertanalyse.

In der linken Spalte sind die Bewertungskriterien ersichtlich, welche aus den jeweiligen Untergruppen bestehen und in Gruppen zusammengefasst sind. Die Gewichtung enthält zwei Spalten, jene der Gruppen und die der Untergruppen. Die Summe der Gewichtungen aller Gruppen muss 100% ergeben, dasselbe gilt für die Gewichtungen pro Untergruppe. Für die Bewertung der Untergruppen wurde in diesem Beispiel das schweizerische System der Schulnoten angewandt. Die Punkte pro Bewertungskriterium gehen aus der Multiplikation der Bewertungszahlen mit den Gewichtungen hervor. Bei der Anwendung der Nutzwertanalyse ist zu bemerken, dass bei diesem Instrument keine Wechselwirkungen oder Wirkungsgefüge berücksichtigt werden. Daher ist bei der Bewertung von Systemelementen mittels Nutzwertanalyse grosse Vorsicht geboten.

2.3 Sensitivitätsmodell

Der theoretische Hintergrund für ein Planungsvorhaben mit dem Ziel, ein System gewollt zu verändern, liefert VESTER (2005: 190ff) mit seinen Arbeitshilfen für ein vernetztes Vorgehen. Dabei vergleicht er die Vorgehensweise mit einer Diagnose eines Patienten und der darauf folgenden Therapie. In Abbildung 10 ist dieses Prinzip von VESTER dargestellt, indem auf der ersten Ebene des Sensitivitätsverfahrens, der Systembeschreibung, die Komplexität der Daten auf einen übersichtlichen aber dennoch systemrelevanten Satz von Einflussgrössen abstrahiert wird, damit nur noch mit wenigen Schlüsselfaktoren weitergearbeitet werden kann. Auf der zweiten Ebene werden die Wechselbeziehungen untersucht und grafisch dargestellt. Bei diesem Vorgehen, das VESTER „Mustererfassung“ nennt, geht es im Wesentlichen um das Erkennen der Rollen der Einfluss-

größen im System und die Charakterisierung des Systemverhaltens. Auf einer dritten Ebene, der Interpretation und Bewertung, wird das analysierte System hinsichtlich einer Optimierung seiner Überlebensfähigkeit beurteilt.

Der Biochemiker und Umweltfachmann Frederic VESTER befasste sich vertieft mit Ideen und Werkzeugen für einen neuen Umgang mit Komplexität und Stress. Er zeigt vor dem Hintergrund eines biokybernetischen Denkansatzes neue Wege für das Erkennen und Verstehen von Komplexität auf. In einem ersten Fazit seines Werkes über die Kunst, vernetzt zu denken stellt er fest, dass man heute der zunehmenden Komplexität immer hilfloser gegenüberstehen. Dabei verweist er auf „die sich häufenden politischen und wirtschaftlichen Fehlentscheidungen“. Der Experte zeigt auf, dass Kommunikationsvorgänge, Steuerungsmechanismen, Austausch- und Regulationsprozesse, die sich auf biologischer, ökologischer und ökonomischer Ebene zwischen Lebewesen abspielen, mit dem Organismus vergleichen lassen. (VESTER 2002: 29, 111)

2.3.1 Grundregeln der Biokybernetik

Zum Erlangen einer „höheren kybernetischen Reife“ von Projekten hat VESTER (2002: 158) acht Grundregeln der Biokybernetik hergeleitet. Vor dem Hintergrund der Automatisierung im Eisenbahnbetrieb seien an dieser Stelle die zwei ersten Grundregeln als theoretische Grundlage für die vorliegende Arbeit kurz erläutert.

„Regel 1: *Negative Rückkoppelung muss über positive Rückkoppelung dominieren. Positive Rückkoppelung bringt die Dinge durch Selbstverstärkung zum Laufen. Negative Rückkoppelung sorgt dann für Stabilität gegen Störungen und Grenzüberschreitungen.*“ Selbstregulationen sind bei sicherheitsrelevanten Funktionen im Eisenbahnbetrieb viele bekannt, beispielsweise beim Aufbau und der Wirkungsweise der Druckluftbremsen, welche in gelöster Stellung die Hilfsluftbehälter der Fahrzeuge füllen, damit bei Absenken des Drucks in der Hauptleitung - vor allem auch bei ungewolltem Druckverlust - die Bremszylinder aller Fahrzeuge wirken können. Andere Beispiele finden sich bei den Sicherungsanlagen, wo bei den Gleisfreimeldeeinrichtungen jeweils dann ein Relais anzieht, wenn der betreffende Gleisabschnitt frei ist. Bewegt sich mindestens eine Achse in den Gleisabschnitt - oder tritt ein Spannungsausfall oder eine andere Störung in der Sicherungsanlage auf - fällt das Relais ab und der Gleisabschnitt wird als „belegt“ rückgemeldet. Unter dem Einfluss mehrerer gleichzeitiger Ausfälle technischer Natur oder bei menschlichem Fehlverhalten kann die Situation infolge positiver Rückkoppelung leicht ausser Kontrolle geraten und es können vermeintlich unmögliche Ereignisse auftreten. Neue automatische Systeme müssen demnach so konstruiert werden, dass sie die Dominanz negativer Rückkoppelungen stets sicherstellen können.

„Regel 2: *Die Systemfunktion muss vom quantitativen Wachstum unabhängig sein. Der Durchfluss an Energie und Materie in lebensfähigen Systemen ist langfristig konstant. Das verringert den Einfluss von Irreversibilitäten und das unkontrollierte Überschreiten von Grenzwerten.*“ (VESTER 2002: 160) Bei dieser Regel handelt es sich um eine Gleichgewichtsbetrachtung, die in der modernen automatisierten und zentralisierten Betriebsführung eine bedeutende Rolle spielen kann. VESTER zieht als Beispiel für die Unvereinbarkeit von permanentem Wachstum mit qualitativer Strukturierung und Funktion das menschliche Gehirn in Betracht: Wo höchste Funktionserfüllung mittels Informationsspeicherung und Informationsverarbeitung verlangt wird, kann Wachstum nur stören. Projiziert man diese Regel in die Problemstellung der Eisenbahn-Betriebszentrale, stellt sich die Frage nach der notwendigen Fachkompetenz, über welche das Personal ständig verfügen muss, damit es auch im sehr unwahrscheinlichen Ereignisfall die richtigen Entscheidungen zeitgerecht treffen kann. Der Rückzug erfahrener Zugverkehrsleiter aus der Fläche und deren Zusammenführung in Betriebszentralen bringt einen gewissen Verlust an Systemkenntnissen mit sich, welchem eine starke Vergrößerung des Überwachungs- und damit Verantwortungsbereichs gegenüber steht.

Das Verstehen und Anwenden der biokybernetischen Grundregeln ermöglicht einen Sprung auf eine neue Organisationsstufe, auf der man mit der Komplexität in der Umwelt besser zurecht kommt. Dazu ist es jedoch erforderlich, dass man von der gewohnten Klassifizierungs-Denkweise zu einer Relations-Denkweise übergeht, welche auf Wirkungsbeziehungen aufgebaut ist. (VESTER 2002: 183) Im Kapitel 3 wird die Komplexität im Eisenbahnsystem anhand von konkreten Beispielen behandelt. Besonders die Auseinandersetzung mit dem Thema der Unfalluntersuchungen zeigt auf, dass heute beim Versuch, das Vorgefallene zu verstehen, wichtige Wirkungsbeziehungen ausser Acht gelassen werden. DÖRNER (2014: 109) stellt dazu fest, dass bei einer Behandlung eines Missstandes nicht nur dieser selbst, sondern zusätzlich das System, in welches er eingebettet ist, beeinflusst. Sonst besteht die Gefahr, nur die Symptome zu beheben, nicht aber deren Ursachen.

2.3.2 Vorgehen für die Modellierung komplexer Probleme

Das Sensitivitätsmodell von VESTER stellt ein geeignetes Instrument im Umgang mit komplexen Fragestellungen dar und wurde von zahlreichen Wissenschaftlern völlig verschiedener Disziplinen übernommen und angewendet. Der Ansatz wurde für die Analysen dieser Arbeit gewählt, weil das Instrument ein in der Anwendung einfaches Instrument darstellt und dennoch ein umfangreiches Verständnis über das System ermöglicht. Es liefert schliesslich Informationen über mögliche Veränderungen auf Systemebene bei Veränderung einzelner Systemelemente.

Das Vorgehen für die Modellierung komplexer Probleme beschreibt VESTER mit seinem „permanenten Orientierungsmodell“, mit welchem man die passende „Therapie“ für einen „Patienten“ finden kann, da uns bei der Behandlung von Systemen - im Gegensatz zur Medizin - oft das gesunde Vergleichsmodell fehlt (vgl. Abbildung 10).

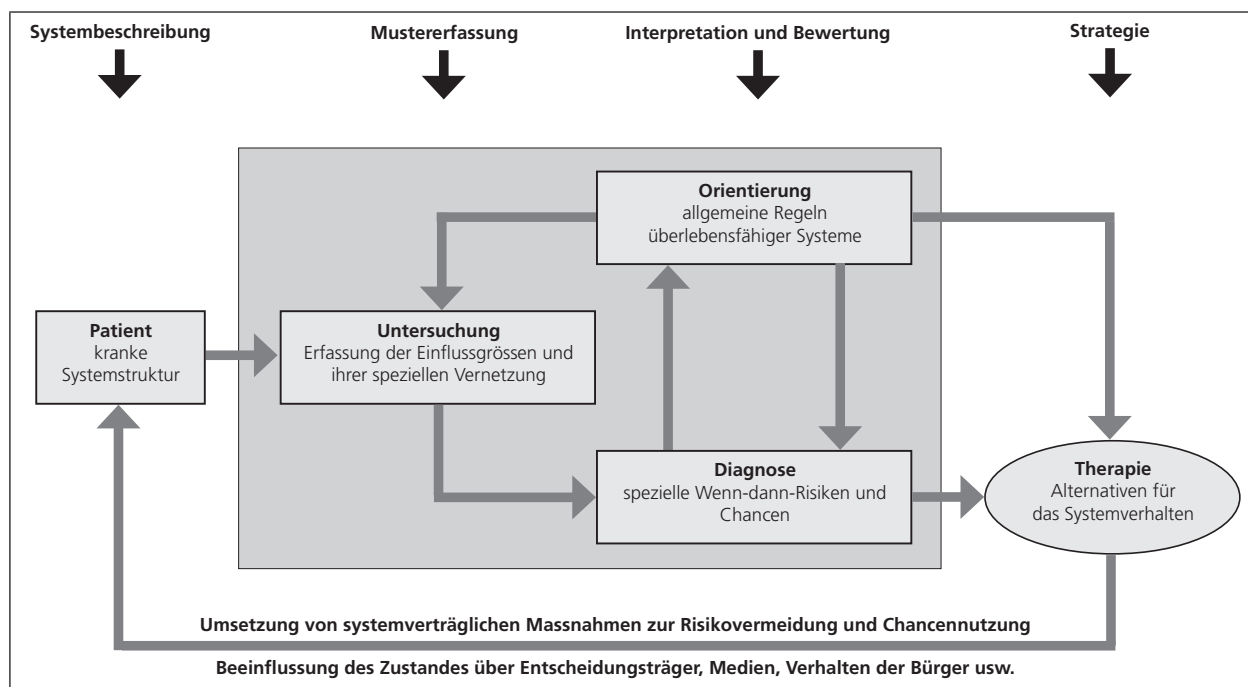


Abbildung 10: Schematische Darstellung für die Vorgehensweise für ein Planungsvorhaben, welche generell als gewollte Veränderung bestehender Systeme angesehen werden können, als Vergleich mit einer Diagnose und einer Therapie. (Darstellung nach VESTER 2005: 190)

Aus diesen Ebenen leitet VESTER insgesamt neun Arbeitsschritte ab, welche ineinander greifen und den Aufbau eines kybernetischen Systems repräsentieren:

- Systembeschreibung,
- Erfassung der Einflussgrößen,
- Prüfung auf Systemrelevanz,
- Hinterfragung der Wechselwirkungen,
- Bestimmung der Rolle im System,
- Untersuchung der Gesamtvernetzung,
- Kybernetik einzelner Szenarien,
- Wenn-dann-Prognosen und Policy-Tests,
- Systembewertung und Strategie.

2.3.3 Wirkungsgefüge in grafischer Darstellung

In dieser Arbeit wird versucht, das Modell sowohl für empirische als auch theoriekritische Untersuchung von Verhaltensmustern an den Schnittstellen Mensch-Maschine im Eisenbahnbetrieb anzuwenden. Ein System besteht aus einer Menge gerichteter Einzelelemente, die zueinander in Wechselbeziehung stehen. Bei der Systemerfassung geht es darum, die einzelnen Elemente in Form von Variablen (veränderliche Größen) zu definieren und deren Wechselwirkungen hinsichtlich ihrer Sensitivität zu bewerten. Zunächst muss das Wirkungsgefüge mit Systemelementen und Wechselbeziehungen erkannt werden, was am besten mittels grafischer Darstellung erfolgt (Abbildung 10). Daraus wird ein Sensitivitätsmodell entwickelt. Als geeignete Darstellung beschreibt MÜLLER (1999: 27) ein Netzwerkdiagramm auf der Basis von Frederic VESTER. Dabei werden die einzelnen Systemelemente mit Pfeilen so miteinander verbunden, dass das grundsätzliche Wirkungsgefüge des Systems sichtbar wird. Durchgezogene Pfeile bedeuten verstärkende, gestrichelte Pfeile zeigen eine abschwächende Wirkung. Auf diese Weise sind bereits mögliche positive und negative Rückkoppelungen im System zu erkennen. Die Abbildung 11 zeigt am Beispiel der Sichtbarkeit eines Signals, dass mehr Gegenlicht die Sichtbarkeit abschwächt. Auch beim Faktor Stress des Lokführers gibt es eine negative Wirkung, indem mehr Stress die Sichtbarkeit des Signals durch einen Mangel an Aufmerksamkeit beeinträchtigt. Umgekehrt setzt die schlechtere Sichtbarkeit den Lokführer zusätzlich unter Stress, womit ein Beispiel einer negativen Rückkopplung gefunden wurde. Die Abbildung 11 dient der Veranschaulichung der genannten Theorien von VESTER und Müller und hat hier keinen Anspruch auf inhaltliche Vollständigkeit.

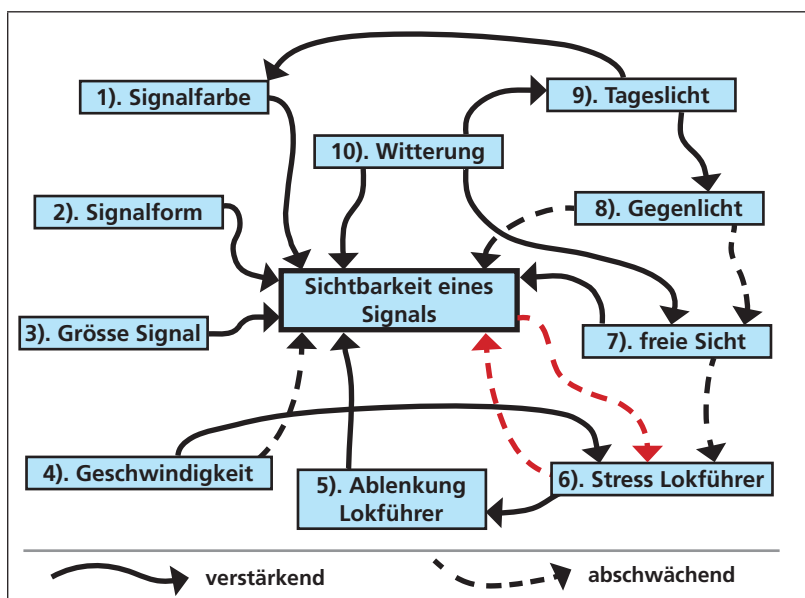


Abbildung 11: grafische Darstellung der Vernetzung von Einflussvariablen am Beispiel der Sichtbarkeit eines Signals: Die durchgezogenen Pfeile bedeuten verstärkende, die gestrichelten Pfeile abschwächende Wirkung bei Veränderung der Ausgangsvariablen. (Darstellung nach Angaben in MÜLLER 1999: 27)

2.3.4 Vernetzungsmatrix

Nach dem Erkennen und Verstehen des Wirkungsgefüges kommt eine Vernetzungsmatrix zur Anwendung, welche die Art der Wirkung jeder Variablen auf jede Variable bewertet wird. Die Tabelle 2 zeigt eine einfache Vernetzungsmatrix, basierend auf oben genanntem Beispiel der Sichtbarkeit eines Signals. Die Bewertung der gegenseitigen Einwirkungen bei Veränderung der Variablen der einzelnen Systemelemente erfolgt qualitativ, indem die Veränderung des Elements, auf das die Einwirkung besteht, mit der Veränderung des Ausgangselements verglichen wird. Auf dieser Basis werden die Werte 1 für schwache, 2 für mittlere und 3 für starke Einwirkungen vergeben. Der Wert 0 steht für keine Einwirkung. Nach der Bewertung werden die Aktiv- und Passivsummen sowie die Produkte Aktivsumme mal Passivsumme und die Quotienten Aktivsumme durch Passivsumme ermittelt. Die Aktivsumme beschreibt die Gesamtheit der Einwirkungen, welche jedes Systemelement im Sinne eines Aktors auf alle anderen Systemelemente ausübt. Die Passivsumme hingegen stellt die Gesamtheit der Einwirkungen dar, welche jedes Systemelement im Sinne eines Sensors von allen anderen Systemelementen empfängt.

aktive Beziehung												Aktivsumme	Quotient Aktivsumme/Passivsumme
von	auf	1). Signalfarbe	2). Signalform	3). Grösse Signal	4). Geschwindigkeit	5). Ablenkung Lokführer	6). Stress Lokführer	7). Sichtbehinderung	8). Gegenlicht	9). Tageslicht	10). Witterung		
1). Signalfarbe			1	0	0	2	1	3	0	0	0	7	0.8
2). Signalform		0		0	0	2	1	3	0	0	0	6	0.6
3). Grösse Signal		1	1		0	1	1	3	0	0	0	7	3.5
4). Geschwindigkeit		0	1	0		2	2	3	0	0	0	8	4.0
5). Ablenkung Lokführer		0	0	0	0		2	3	0	0	0	5	0.3
6). Stress Lokführer		0	0	0	0	3		2	0	0	0	5	0.3
7). Sichtbehinderung		0	0	0	1	3	3		1	0	0	8	0.3
8). Gegenlicht		3	2	2	0	3	3	3		0	0	16	4.0
9). Tageslicht		3	3	0	0	1	1	3	1		0	12	12.0
10). Witterung		2	2	0	1	2	2	2	2	1		14	100.0
Passivsumme		9	10	2	2	19	16	25	4	1	0		
Produkt Aktivsumme*Passivsumme		63	60	14	16	95	80	200	64	12	0		

Bewertungsskala:

- 1 schwache Einwirkung
- 2 mittlere Einwirkung
- 3 starke Einwirkung
- 0 keine Einwirkung

Tabelle 2: Vernetzungsmatrix am Beispiel der Sichtbarkeit eines Signals. (Darstellung nach Angaben in MÜLLER 1999: 29-31)

MÜLLER (1999: 30) stellt die Interpretation der Quotienten und Produkte von Aktiv- und Passivsummen wie folgt dar:

Quotient Aktivsumme durch Passivsumme

- Element mit hohem Quotient bedeutet „aktives Element“, es beeinflusst die anderen Elemente mehr, als selbst von anderen beeinflusst zu werden,
- Element mit tiefem Quotient bedeutet „reaktives Element“, es beeinflusst die anderen Elemente weniger, als selbst von anderen beeinflusst zu werden.

Produkt Aktivsumme mal Passivsumme

- Element mit hohem Produkt bedeutet „kritisches Element“, es beeinflusst andere Elemente stark und wird auch stark von anderen beeinflusst,
- Element mit tiefem Produkt bedeutet „pufferndes Element“, es beeinflusst andere Elemente schwach und wird schwach von anderen beeinflusst.

Diese Vorgehensweise nach VESTER zur Systemabgrenzung, Mustererfassung, Bewertung und Interpretation von Systemelementen zeichnet sich besonders dahingehend aus, dass es zu einer vernetzten Denkweise zwingt, indem es den Fokus auf die Beziehungen und Wechselwirkungen legt.

Für eine vertiefte Analyse genügen jedoch Aktiv- und Passivsummen nicht. Der Quotient von Aktiv- und Passivsumme erlaubt die Untersuchung der Variablen bezüglichem ihrem aktiven oder reaktiven Charakter. Das Produkt von Aktiv- und Passivsumme liefert Aussagen über den kritischen oder puffernden Charakter der Variablen. (VESTER 2002: 230ff)

2.3.5 Grafische Interpretation

Die grafische Darstellung der Vernetzungsmatrix in Abbildung 12 erlaubt schliesslich die Interpretation der Systemelemente, indem die Position der einzelnen Variablen bezüglich der vier Schlüsselrollen „aktiv“, „reaktiv“, „kritisch“ und „puffernd“ visualisiert werden kann. Dabei werden die Aktiv- und Passivsummen der einzelnen Systemelemente in einem Koordinatensystem dargestellt. Es bilden sich vier Quadranten, welche die aktiven, passiven, kritischen und stillen Elemente repräsentieren. Die Lage der einzelnen Elemente im Koordinatensystem lässt Rückschlüsse auf deren Verhalten bei Veränderungen zu.

Aus der Vernetzungsmatrix geht hervor, dass sich die Variable „Sichtbehinderung“ (7), tendenziell auch die Variablen *Ablenkung Lokführer* (5) und *Stress Lokführer* (6), im kritisch-reaktiven Bereich liegen. Veränderungen dieser Variable können (in unserem Beispiel verständlicherweise) gefährlich werden. Die Variable eignet sich aber auch gut als Indikator. Die drei Variablen *Gegenlicht* (8), *Tageslicht* (9) und *Witterung* (10) zeichnen sich als aktive Elemente aus. Veränderungen bei diesen Elementen zeigen grosse Wirkung auf das System, welches sich danach erneut stabilisiert. Die Variablen *Geschwindigkeit* (4) und *Grösse Signal* (3) zeichnen sich dadurch aus, dass Veränderungen nur geringe Wirkungen zeigen. Variablen, die im gelb bezeichneten Neutralbereich in der Mitte des Koordinatensystems zu liegen kommen, eignen sich nicht zur Steuerung, wohl aber zur Selbstregulierung des Systems. Auf diese Weise kann aus der grafischen Darstellung der Vernetzungsmatrix die Rolle der einzelnen Elemente bezogen auf das System ermittelt werden.

Im Eisenbahnwesen und vor dem Hintergrund der Bahnreformen zur unternehmerischen Trennung von Rad (Eisenbahnverkehrsunternehmen) und Schiene (Infrastrukturunternehmen) wird die vernetzte Denkweise strapaziert, indem auf organisatorisch-administrativer Ebene und im Management der Unternehmungen neue aufwändige Schnittstellen geschaffen werden. Damit geraten viele nach wie vor wirksame Wechselbeziehungen aus dem Blickfeld der Verantwortlichen, was zu einer gefährlichen Entwicklung führen kann. Beispiele zu diesem Thema sind im Kapitel 3 vorgestellt.

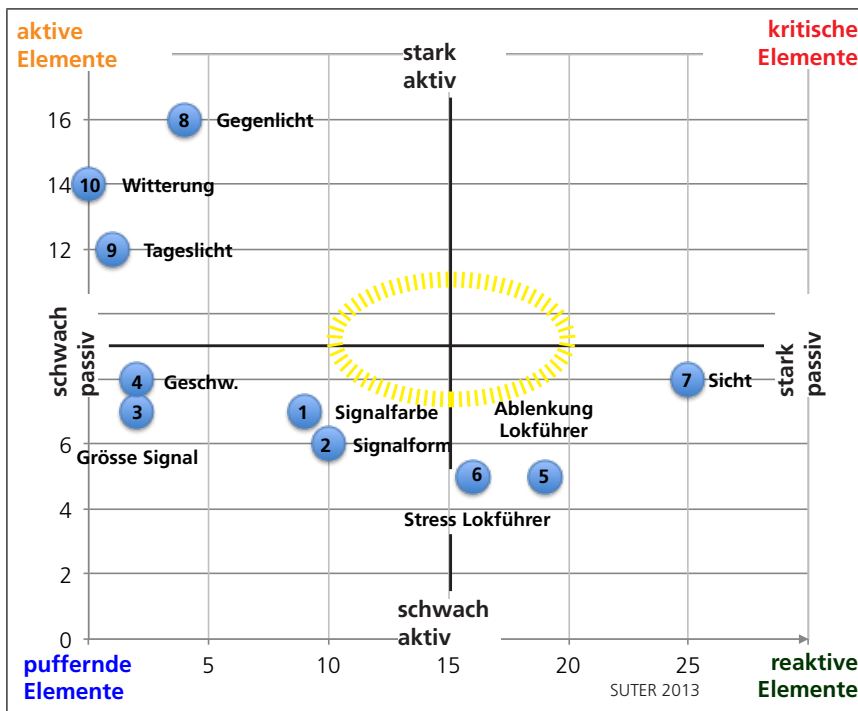


Abbildung 12: grafische Interpretation der Vernetzungsmatrix. (Darstellung nach Angaben in VESTER 2002: 234f)

2.3.6 Vergleich mit System Dynamics

Eine Methode, die für die Untersuchung von komplexen Systemen verbreitet angewendet wird, ist der vom amerikanischen Ingenieur Jay W. FORRESTER entwickelte Ansatz der „Systems Dynamics“ (SD). Im Gegensatz zum Sensitivitätsmodell von VESTER ist diese Methode auf die numerische (quantitative) Simulation ausgerichtet. (SCHMID 2011: 56f) Die SD-Methode ist nach LANE (2000: 4) mit drei wesentlichen Eigenschaften zu Charakterisieren:

1. *Rückkopplungen*, welche über kausale Wechselwirkungen den Zustand des Systems beeinflussen,
2. *Computergestützte Simulationen*, welche das Verhalten des Systems über ein Zeitintervall ermöglichen,
3. *Mentale Modelle*, welche eine wichtige Grundlage für die Modellierung des Systems darstellen.

Die generische Beschaffenheit von System Dynamics erlaubt eine vielseitige Anwendung der Methode. Da sowohl sozial-ökonomische als auch mathematisch-physikalische Systeme untersucht werden können, eignet sich System Dynamics auch für die Untersuchung von Problemen an den Schnittstellen Mensch-Maschine. Um den SD-Ansatz von jenem von VESTER abzugrenzen, kann eine Analyse der jeweiligen Beschreibungsmittel, Methoden und Werkzeuge erfolgen, was SCHNIEDER (1999: 18) mit dem BMW-Prinzip bezeichnet. Während die Beschreibungsmittel beider Ansätze aus Vernetzungsgrafiken bestehen, beruht der SD-Ansatz von FORRESTER bezüglich Methoden auf Differenzialgleichungen. VESTER hingegen wendet qualitative Bewertungsmethoden an. Im Hinblick auf Werkzeuge ist beim Ansatz von VESTER das Sensitivitätsmodell mit graphischer Auswertung zu nennen, während beim SD-Ansatz kein spezifisches Werkzeug vorhanden ist. Wenn - wie beim Ansatz von VESTER - Beschreibungsmittel, Methoden und Werkzeuge zusammenhängen, spricht man von einer Technik. Sind nur Beschreibungsmittel und Methoden verbunden, wird der Ansatz Verfahren genannt. (HOSSE, mündliche Stellungnahme am 28.04.2014)

2.4 Beschreibungsmittel Petrinetze

Jedes System lässt sich in idealisierter Form von Knoten und Kanten als Netz darstellen. Die Knoten repräsentieren die Aktivitäten der Systemelemente mit verteilter oder verarbeitender Funktion. Die Kanten stellen die Wechselwirkungen zwischen den Systemelementen dar und erlauben in ihrer Gesamtheit die Darstellung eines Wirkungsgefüges. Die Abbildung eines Systems in der Gestalt eines Netzes kann als Graph aufgefasst werden. Für die mathematische Behandlung der Systemnetze kann somit die Graphentheorie herbei gezogen werden. (SCHNIEDER 1993: 8) Für die vorliegende Arbeit werden als Beschreibungsmittel Petrinetze verwendet, um die Ausschnitte aus dem Eisenbahnsystem, die zu einem bestimmten Zweck modelliert werden sollen, abzugrenzen. Wenn das System gegen die Umwelt abgegrenzt werden soll, muss es als eigenständig betrachtet und beschrieben werden können. (SCHNIEDER 1993: 15) Eine Systemgrenze gilt als mehr oder weniger willkürliche Abgrenzung zwischen Systemen. Was nun zum betrachteten System und was zur Umwelt gehört, richtet sich nach der Problemstellung der Untersuchung und liegt letztlich in der Entscheidung des Betrachters. Die Systemumwelt oder Umsysteme müssen stets in die Betrachtung mit einbezogen werden. (NINCK/BÜRKI/HUNGERBÜHLER/MÜHLE-MANN 2004: 34-35)

Petrinetze weisen die Eigenschaft auf, Ausprägungen der Systemaxiomatik und Objektorientierung anschaulich graphisch sowie formal, d. h. mathematisch exakt und präzise definieren zu können. (SCHNIEDER 1999: 63) Mit Petrinetzen können die Kausalzusammenhänge zwischen Ereignissen und Systemzuständen veranschaulicht werden, sie stellen das Geflecht der Kausalketten grafisch dar. (SCHNIEDER 1993: 10) Ursprünglich für die Beschreibung von rein technischen Prozessen entwickelt, werden Petrinetze seit einigen Jahren auch im Bereich der Mensch-Maschine-Interaktionen verwendet. Mit Petrinetzen lassen sich Ereignisse mit Zuständen und Übergängen von Zuständen exakt abbilden und sie eignen sich daher auch, komplexere Wirkungsbeziehungen zu beschreiben, wie dies für die Berufe Zugverkehrsleiter und Lokführer am Stellwerk bzw. im Lokführerstand zutrifft. Bei der vorliegenden Arbeit wird versucht, konkrete betriebliche Situationen, welche im Rahmen von aufwändigen Fallstudien mit Lokführern auf einem Vollsimulator durchgeführt wurden, in einer Übersicht verständlich zu machen, um daraus Erkenntnisse über die Anforderungen an Simulationsmodelle von Eisenbahnsystemen zu gewinnen.

Im Folgenden wird versucht, die Verwendung von Petrinetzen für eisenbahnbetriebliche Situationen an einem einfachen Beispiel zu erläutern. Die in Abbildung 13 dargestellte betriebliche Situation soll mittels Petrinetzen so modelliert werden, dass sie einerseits die Handlungen des Zugverkehrsleiters und der Lokführer der Züge 1 und 2 abbilden. Bezüglich Infrastruktur gibt es eine Weiche, vier Zugfahrstrassen (ef/fe und gf/fg) mit drei Hauptsignalen (E, F und G), vier Gleisisolierungen (gelb markiert) und zwei Streckenblock-Einrichtungen. Oben rechts ist die Verschlussstabelle abgebildet. Zug 1 verkehrt von Emmenmatt nach Langnau, Zug 2 von Langnau nach Zollbrück. Der Einfachheit halber sind in diesem Beispiel weder einzelne Schaltungen des Stellwerks noch mögliche menschliche oder technische Fehler berücksichtigt. Der Situation wird unterstellt, dass die beiden Fahrstrassen vorschriftsgemäss und störungsfrei eingestellt und von den Zügen jeweils ohne besondere Vorkommnisse abgefahren werden.

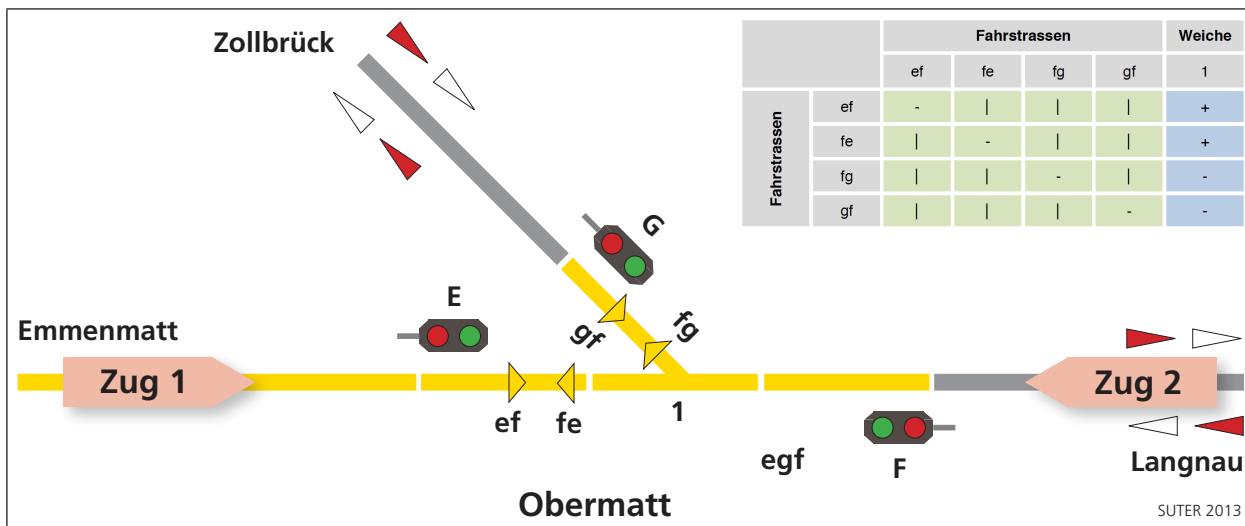


Abbildung 13: Beispielhafte Situation an der Signalstation Obermatt (Strecke Bern - Langnau - Luzern). Die Station ist mit einem elektromechanischen Stellwerk ausgerüstet, welches von einem Zugverkehrsleiter örtlich bedient wird.

Das Petrinetz in Abbildung 14 zeigt die prinzipielle Anwendung dieses Beschreibungsmittels für Problemstellungen bei der Betriebsführung der Eisenbahn. Das Modellbeispiel ist stark vereinfacht, um die Übersichtlichkeit als theoretische Grundlage zu wahren. Petrinetze eignen sich jedoch auch für komplexere Situationen. Dabei können sämtliche Wahrnehmungen, Entscheidungen und Handlungen des beteiligten Personals sowie die Schaltungen und Schaltzustände der Sicherungsanlagen und Fahrzeuge mit einbezogen werden. Für spezifische Zustände von Elementen der Sicherungsanlagen und Fahrzeugen (Signale, Weichen, Geschwindigkeit usw.) sollen entsprechend angepasste Markierungen der Plätze angewendet werden. MÖHLENBRINK (2010: 42) hat in seiner Dissertation die Modellierung und Analyse von menschlichen Entscheidungsheuristiken mit farbigen Petrinetzen untersucht und entwickelt. Farbige Petrinetze eignen sich besonders, um komplexe Sachverhalte einfach und übersichtlich darzustellen, da die Marken im Gegensatz zu einfachen Petrinetzen bestimmte Werte annehmen und auf diese Weise unterschieden werden können.

Die Verwendung von Petrinetzen soll in der vorliegenden Arbeit zur Beschreibung der Stellwerklogik dienen, mit dem Ziel, einem Modellierungsstandard für diese Anwendung einen Schritt näher zu kommen. ANTONI (2009: 21ff) hat mit seiner Dissertation über die Petrinetz-basierte Validierung von Eisenbahnsicherungssystemen bereits wichtige Grundlagen geschaffen, welche die Entwicklung von Stellwerken vereinfachen soll. Die Perspektive, aus welcher ANTONI (2009: 105) das System betrachtet, erlaubt jedoch ausschliesslich technische Sichtweise und befasst sich weniger mit den Wechselbeziehungen zwischen Sicherungsanlage und dem Faktor Mensch. Demnach definiert ANTONI rechnergestützte Systeme - wie elektronische Stellwerke - als endliche Automaten. In dieser Arbeit gilt es nun, sich der Herausforderung anzunehmen, die Bediener und verantwortlichen Personen ebenfalls in die Systemabgrenzung einzuschliessen. Dazu eignet sich das durch die TU Braunschweig entwickelte II-Tool, welches die rechnergestützte Modellierung von übersichtlichen Petrinetzen erlaubt und mittels Simulation vollständige RAMS-Analysen ermöglicht. (http://www.iqst.de/?page_id=24, Zugriff am 25.11.2013)

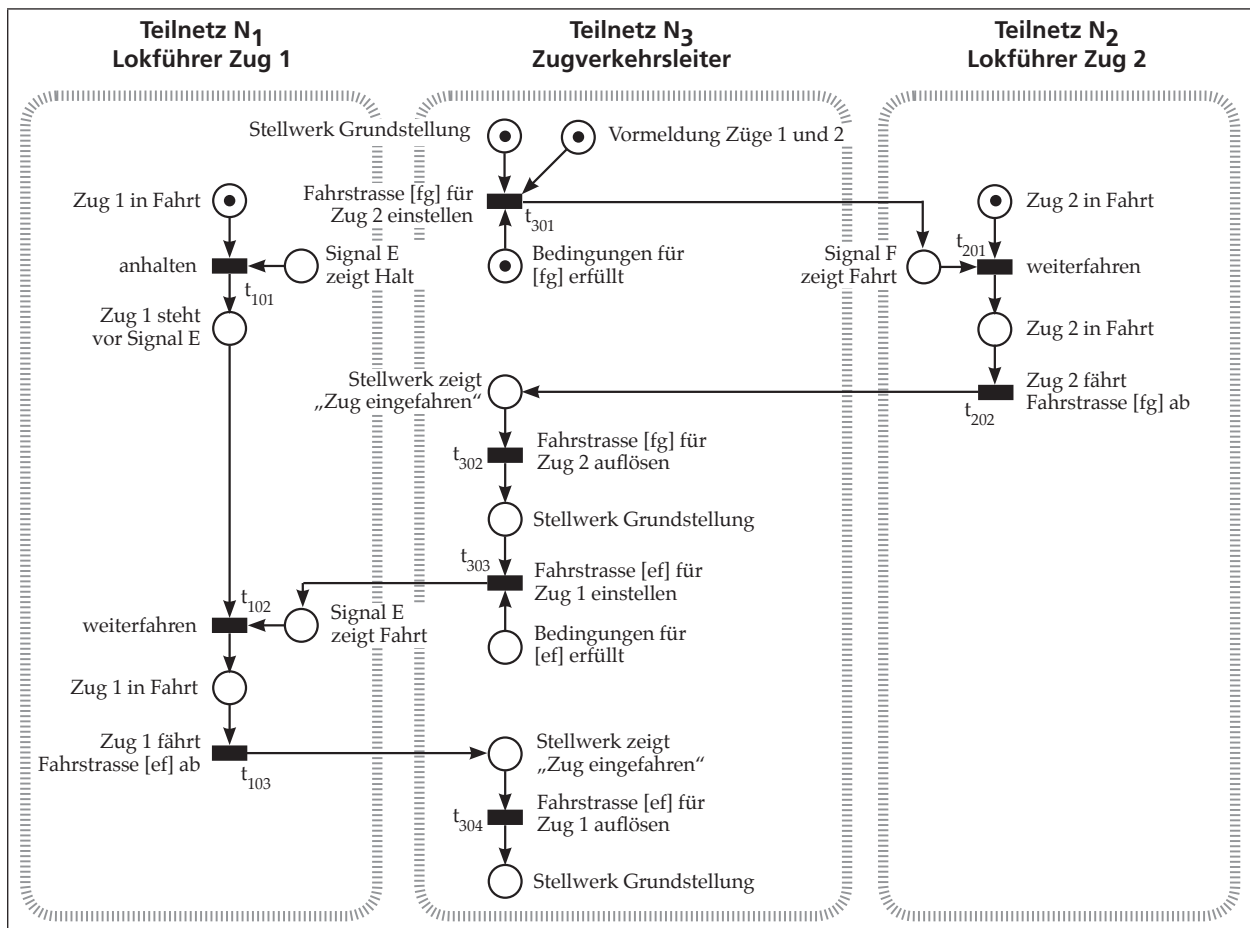


Abbildung 14: Die oben beschriebene Beispielsituation als Petrinetz mit drei Teilnetzen zur Visualisierung der Anwendung von Petrinetzen für die Beschreibung von Problemstellungen aus der Eisenbahnbetriebsführung. Zur Vereinfachung wurden mögliche Fehler und Störungen nicht berücksichtigt.

Für die vorliegende Arbeit wurde Stellwerklogik am Beispiel des Schalterwerks Obermatt unter Anwendung des Π -Tools modelliert. Dabei wird die Absicht verfolgt, die einzelnen Elemente der Stellwerklogik so in Teilnetzen zusammenzufassen und miteinander zu verbinden, dass sie im Sinne einer Standardisierung möglichst für alle Stellwerktypen angewendet werden können. Die Abbildung 15 zeigt als Beispiel die Modellierung des Streckenblocks als Petrinetz. Dieses Werkzeug bildet die Grundlage, technische und betriebliche Prozesse integriert zu beschreiben. Lisandro QUIROGA (schriftliche Stellungnahme am 08.01.2014), Betreiber des Π -Tools stellt fest, dass sich Petrinetze auch für die Modellierung der Stellwerklogik eignen können, da es sich dabei um ein Modell eines sicherheitsrelevanten Systems mit diskreten Zuständen handelt. Etwas schwieriger beurteilt er die Entwicklung einer Schnittstelle für den Datenimport zum Beispiel aus dem Instrument QRailScan. Das Π -Tool nutzt für das Abspeichern seiner Modelle das Datenformat Petri Net Markup Language (PNML, ähnlich XML). Es ist denkbar, dass die aus QRailScan stammenden Daten allenfalls in eine PNML Datei eingearbeitet werden. Dabei ist jedoch der Aufwand nicht zu unterschätzen.

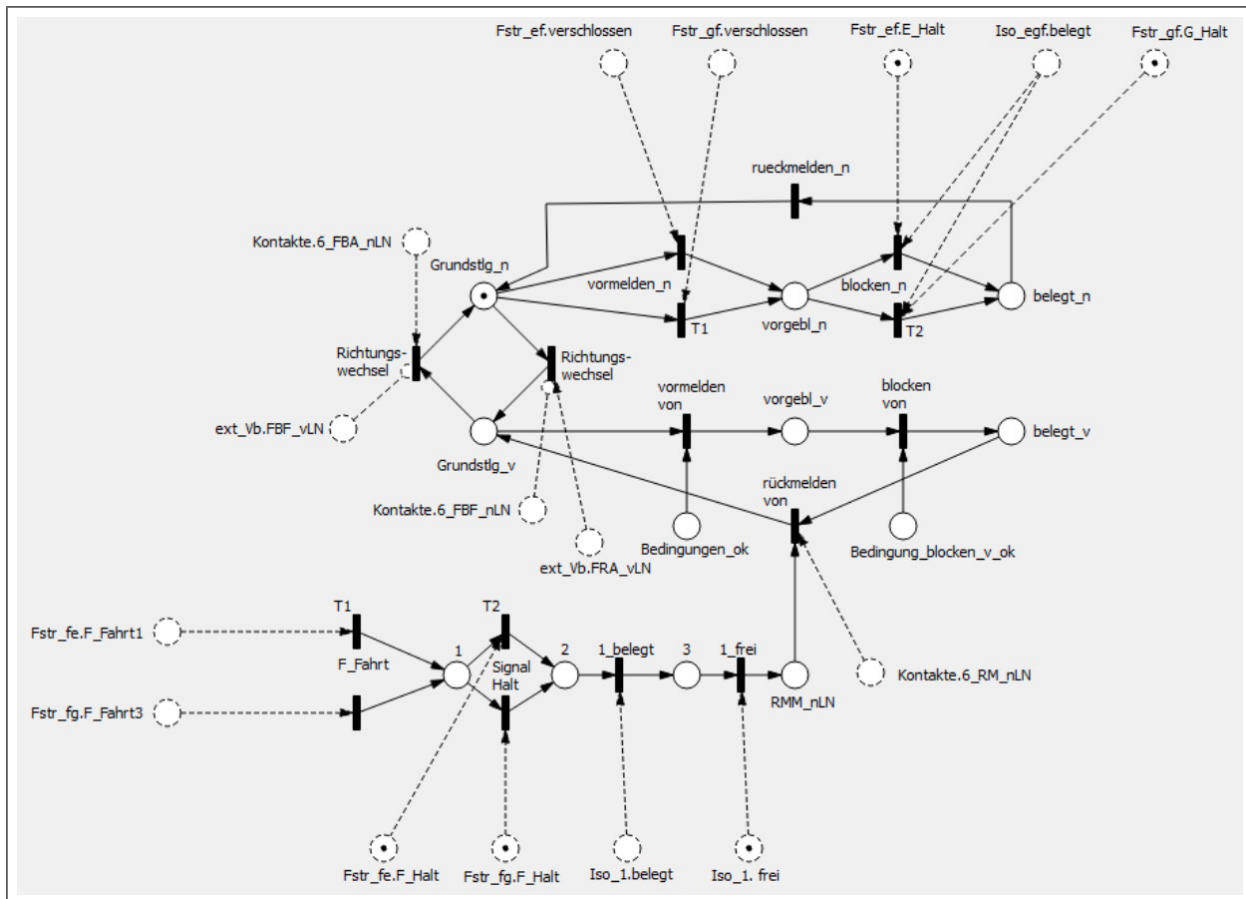


Abbildung 15: Simulationsfähige Modellierung des Streckenblocks. (Quelle: Programm II-Tool)

2.5 Hermeneutischer Zirkel

Für das Verstehen der Komplexität im Eisenbahnsystem genügen induktive und deduktive Wege der Erkenntnis aus den exakten Wissenschaften nicht, da die erzielten Resultate ausgelegt und gedeutet werden müssen. Im Rahmen dieser Arbeit wird versucht, die hermeneutische Methode anzuwenden, welche auf der Kombination von Induktion und Deduktion beruht: „Der Prozess der Erfassung und Interpretation des Forschungsgegenstandes erfolgt zirkulär in dem Sinne, dass durch das Verstehen eines Sachverhaltes auch ein anderer Sachverhalt in einem neuen Licht erscheint. Dieser Kreislauf setzt sich immer weiter fort, weshalb in diesem Zusammenhang vom hermeneutischen Zirkel gesprochen wird.“ SCHUMANN (2004: 14)

Die hermeneutische Methode wurde für diese Arbeit deshalb gewählt, weil bei den analysierten Problemstellungen im Zusammenhang mit der Schnittstelle Mensch-Maschine bei der Eisenbahn ein Vorverständnis des Lesers vorausgesetzt werden kann, welches jedoch für das unmittelbare und vollständige Verständnis der Problemstellung nicht hinreichend ist. Die zyklische Wiederholung von Vorverständnis und Theorie erscheint geeignet zum Erlangen eines vertieften Verständnisses der in dieser Arbeit behandelten Problematiken. Die Abbildung 16 visualisiert den hermeneutischen Zirkel, welcher den induktiven und den deduktiven Weg miteinander vereint. Qualitative Daten können grundsätzlich induktiv (vom Besonderen zum Allgemeinen), deduktiv (vom Allgemeinen zum Besonderen) oder gemischt induktiv-deduktiv analysiert werden. Das Verständnis einer Theorie oder einer Evaluation setzt jedoch ein Vorverständnis voraus.

Daraus geht die Bedeutung von Modellen hervor, welche aus den Beobachtungen von Phänomenen aus der Realität die Interpretation für wissenschaftlichen Aussagen erlauben. SCHUMANN (2004: 11ff) zeigt in seinem Arbeitsbericht auf, dass bei einem auf Beobachtungen und Experimenten

basierenden induktiven Schluss auf einen allgemeinen Satz geschlossen wird. Durch Wiederholungen und Verallgemeinerungen können daraus umfassende Theorien hervorgehen, welche man jedoch stets in Frage stellen kann. So kann sich der Schluss eines sicheren Zustandes auf Grund technischer Rückfallebenen beim gleichzeitigen Ausfall einer hinreichend grossen Zahl von Komponenten als falsch erweisen. Die Erkenntnisse auf dem induktiv-empirischen Weg werden meistens unter hohen Aufwänden aus statistischen Auswertungen generiert. Ein weiterer Nachteil dieses Erkenntnisweges ist es, dass die Wahrheit des allgemeinen Satzes, auf den von besonderen Beobachtungen geschlossen wird, nicht garantiert werden kann. Der allgemeine Satz kann sich auch als falsch erweisen. Im Gegensatz dazu beschreibt die Deduktion die logische Ableitung des Besonderen aus dem Allgemeinen, wobei die dazu grundlegenden Theorien kritisch hinterfragt werden. Es lassen sich jedoch nicht alle Theorien empirisch überprüfen, was zu falschen Schlussfolgerungen führen kann. Die hermeneutische Komponente verbindet Induktion und Deduktion indem Beobachtungen und Messungen jeweils deutend interpretiert und analysiert werden, um subjektive Sinneszusammenhänge nachvollziehbar zu verstehen. In diesem Sinne soll die Hermeneutik dazu beitragen, Beobachtungen aus Experimenten an den Schnittstellen Mensch-Maschine im Eisenbahnsystem zu erklären und vor dem Hintergrund allgemeingültiger Theorien zu verstehen.

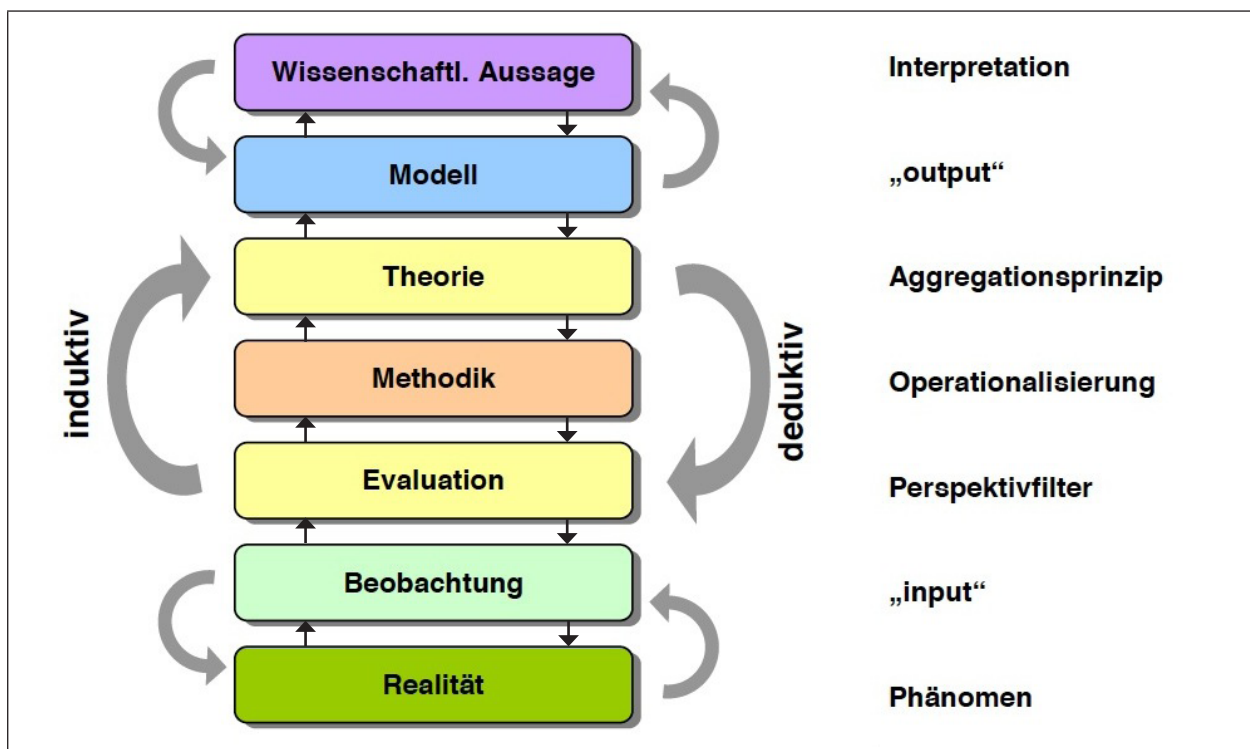


Abbildung 16: Hermeneutischer Zirkel. (Quelle: EGLI/MESSERLI, 2003: abgeändert)

2.6 Experteninterviews

Die Untersuchungen für diese Arbeit bewegen sich in einem interdisziplinären Umfeld. Die eigene Herleitung der benötigten Erkenntnisse in genügender Tiefe würde die für dieses Projekt vorhandenen Möglichkeiten übersteigen. Unter Berücksichtigung der Machbarkeit dieses Projekts kommen auch qualitative Methoden zum Einsatz, indem mit ausgewählten Fachpersonen zu bestimmten Forschungsfragen Leitfadeninterviews durchgeführt werden. FLICK (2002: 117) erklärt die zunehmende Aufmerksamkeit gegenüber Experteninterviews damit, „dass in der relativ offenen Gestaltung der Interviewsituationen die Sichtweisen des befragten Subjekts eher zur Geltung kommen als in standardisierten Interviews oder Fragebögen.“ Aus den Gesprächen mit den Fachpersonen sollen einerseits technische Informationen hervorgehen, andererseits gilt es, die Meinung der Experten über einen bestimmten Sachverhalt zu erfahren und in den Kontext zu stellen.

Die Auswahl umfasst Fachpersonen aus den Bereichen Eisenbahnbetrieb, Industrie, Wissenschaft sowie Armee. Es wurden insgesamt 13 Personen angefragt, ob sie sich für ein Experteninterview zur Verfügung stellen würden. Dies führte schliesslich zu 11 persönlichen Interviews, zwei Personen haben es vorgezogen, den Interviewleitfaden schriftlich zu beantworten oder zu ergänzen. Zur Klärung von technischen Fragen wurden weitere Fachpersonen um Auskunft gefragt, womit schliesslich elf mündliche und sechs schriftliche Stellungnahmen zur Verfügung stehen. Die Leitfadeninterviews wurden jeweils wörtlich transkribiert und codiert. Die Auskunftspersonen sind im Quellenverzeichnis tabellarisch dargestellt. Die Abbildung 17 zeigt die Namen der ausgewählten Fachpersonen im Kontext der Untersuchungsschritte.

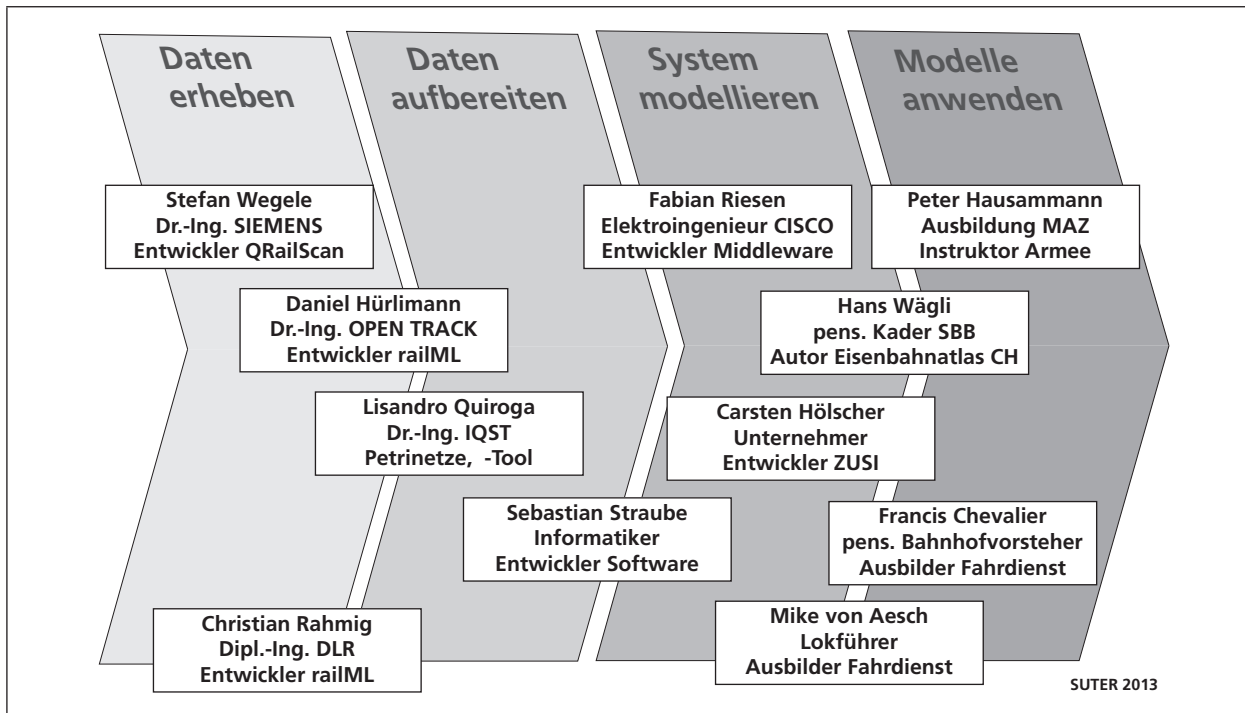


Abbildung 17: Auswahl der Fachpersonen für die Experteninterviews vor dem Hintergrund der grundsätzlichen Untersuchungsgegenstände dieser Arbeit.

2.7 Benennungen und Definitionen

Definitionen schaffen ein gemeinsames Verständnis, indem sie Bezeichnungen von Sachverhalten, Vorgängen und Eigenschaften in einen beabsichtigten Kontext stellen, erklären und abgrenzen. Definitionen bezwecken in erster Linie das Verhindern einer Fehlinterpretation der Begriffe und deren Anwendung ausserhalb des gewollten Zusammenhangs. Insbesondere sollen es Definitionen ermöglichen, das Handeln der am System beteiligten Personen auf die gemeinsamen Ziele auszurichten. Es liegt in der Natur der Sache, dass den Definitionen im Gebiet der Eisenbahnen eine wichtige Rolle zugeschrieben wird, da der Konstruktion und dem Betrieb von technischen Einrichtungen die korrekte Beschreibung einer Vielzahl von Gegenständen, Vorgängen und Eigenschaften zu Grunde liegt. (STEIN 2009: 24f)

Die Betriebsführung erfordert eine strikte Ausrichtung des Handelns der verantwortlichen Personen, da Fehlhandlungen einen hohen Schaden bewirken können. Im Zeitalter der Interoperabilität gewinnen einheitliche, international anerkannte Definitionen an Bedeutung. Besonders hinsichtlich der grossen technischen Unterschiede zwischen den Eisenbahnen einzelner Länder, wie zum Beispiel im Bereich der Signalisierung, sowie der unterschiedlichen Landessprachen erscheint für den internationalen Verkehr ein einheitliches Verständnis von Bezeichnungen, Vorgängen und Eigenschaften als ausgesprochen wichtig. Leider ist die technische Entwicklung bis heute zu weit

fortgeschritten, um alle Definitionen ohne weiteres zu vereinheitlichen. So zum Beispiel hängen viele betriebliche Vorgänge direkt von der Philosophie der Stellwerklogik ab, welche sich nur mit sehr hohem Aufwand und hoher Akzeptanz der Verantwortlichen anpassen lässt.

Abbildung 18 zeigt einen Ausschnitt aus einer Betriebsvorschrift für die Abwicklung des Zugverkehrs auf der Signalstation Obermatt. In diesem Beispiel werden die Synonyme „*Ruhelage*“ bzw. „*normale Lage*“ definiert. Der Kontext dieser Begriffe ist klar angegeben, indem sich die Beschreibung unmissverständlich auf das Stellwerk bezieht. Dabei werden weitere Bezeichnungen („*Weichenhebel*“, „*Wärterhaus*“, „*Weiche*“, „*Abschlussignale*“, „*Verriegelungshebel*“), ein Vorgang („*nach Belieben umgelegt werden kann*“) sowie Relationen („*gegen das Wärterhaus geneigt*“, „*für die Fahrten Bern-Langnau, resp. Langnau-Bern gestellt*“, „*die 3 Abschlussignale zeigen rot*“, „*beide Signalhebel und der Verriegelungshebel stehen senkrecht*“) genannt. Die Begriffe „*Abschlussignale*“ und „*Verriegelungshebel*“ haben innerhalb der technischen Einrichtung ihren festen Platz eingenommen. Es ist anzunehmen, dass Objekte in anderen Ländern, welche die gleiche oder zumindest eine sehr ähnliche Funktion erfüllen, andere Benennungen erhalten haben. Zur Zeit des mechanischen Stellwerks in Obermatt wurden keine Überlegungen angestellt, ob die Lokführer anderer Eisenbahnunternehmungen oder gar Länder den Begriff des Abschlussignals verstehen sollten.



Abbildung 18: Definition der Ruhelage am Stellwerk der Signalstation Obermatt nach einer Instruktion der damaligen Jura-Simplon-Bahn, um Missverständnisse und Fehlhandlungen auszuschliessen. Die Definitionen haben sich national und innerhalb von Fachbereichen getrennt entwickelt. (JURA-SIMPLON-BAHN, 1900: 4)

Zusammen mit der Vielsprachigkeit Europas stellen die Definitionen innerhalb des Eisenbahnsystems für den grenzüberschreitenden Verkehr eine grosse Herausforderung dar. Es gilt, neue Definitionen in den internationalen Kontext zu stellen und zu vereinheitlichen. In den Schweizerischen Fahrdienstvorschriften (FDV) beispielsweise werden sämtliche zu verwendenden Begriffe in den drei relevanten Landessprachen deutsch, französisch und italienisch einander gegenübergestellt und erklärt. (BUNDESAMT FÜR VERKEHR, 2012: 27ff) Im Bereich von Grenzbahnhöfen erstellen Eisenbahner z.T. auf freiwilliger Basis aufwändige Verzeichnisse, welche gleiche oder ähnliche Begriffe der Nachbarländer gegenüberstellen und erklären. Das European Train Control System (ETCS) stellt ferner ein gutes Beispiel für die Absicht einer Vereinheitlichung von Definitionen dar, welche auch vielen länderspezifischen Eigenheiten Rechnung tragen müssen.

Das Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik an der Technischen Universität Braunschweig entwickelt seit 2009 das intelligente Glossar „iglos“, welches sich unter anderem mit den Möglichkeiten der Modellierung von Wissen und der Vermeidung von Missverständnissen im interdisziplinären Kontext befasst. Die Entwicklung von iglos erschliesst einen Lösungsansatz, indem nicht die durch allmähliche Entwicklung von Systemen fest gebundenen Begriffe an sich angepasst werden, sondern mittels elektronischem Terminologiemanagement einen neuen Zugang zu den Begriffen geschaffen wird. (www.iglos.de, 27.12.2013)

2.8 System- und Modellbegriff

Für die vorliegende Arbeit werden nachstehend die relevanten Begriffe System, Modell und Simulator bzw. Simulation definiert, um an dieser Stelle ein gemeinsames Verständnis im Kontext dieses Projekt zu schaffen. Die übrigen verwendeten Begriffe sind im Glossar dieser Arbeit aufgeführt.

2.8.1 Reales, kompliziertes und komplexes System

Ein komplexes System besteht aus mehreren verschiedenen Elementen, die in einer bestimmten dynamischen Ordnung zu einander stehen und zu einem Wirkungsgefüge vernetzt sind. Jeder Eingriff in dieses Gefüge verändert die Beziehung der Elemente zueinander und damit den Gesamtcharakter des Systems. Reale Systeme hingegen sind offen und erhalten sich durch den Austausch mit ihrer Umwelt. (VESTER 2002a: 24-25) Komplizierte Systeme können zwar viele Elemente und Beziehungen aufweisen, die jedoch nicht lernfähig, das heisst nicht offen für selbstständige Veränderungen sind. Bei komplexen Systemen nimmt die Zahl der möglichen Beziehungen mit der Zahl der Systemelemente quadratisch zu. Komplexe Systeme sind offen für Informationen und entwickeln sich in einem fortlaufenden Prozess, sie sind daher nicht stabil und können nicht mit einfachen Eingriffen repariert werden. (NINCK/BÜRKI/HUNGERBÜHLER/MÜHLEMANN, 2004: 42-43)

Reale Systeme	immer offene Systeme, die sich durch Austausch mit Umwelt erhalten.
Komplizierte Systeme	viele verschiedene Komponenten
	viele verschiedene Beziehungen
	Verhalten des Systems unveränderlich und überschaubar; Probleme können abschliessend analysiert und gelöst werden.
Komplexe Systeme	veränderbare Komponenten
	veränderbare Beziehungen
	Verhaltensmöglichkeiten des Systems variabel und vielfältig; Probleme können auch mit viel Aufwand und ausreichenden Kenntnissen nicht abschliessend gelöst werden.

Tabelle 3: Übersicht über die Eigenschaften realer, komplizierter und komplexer Systeme nach VESTER (2002a: 25) und NINCK/BÜRKI/HUNGERBÜHLER/MÜHLEMANN, 2004: 42-43)

Anhand der in Tabelle 3 aufgelisteten Eigenschaften von realen, komplizierten und komplexen Systemen werden für die vorliegende Arbeit folgende Definitionen abgeleitet:

Reale Systeme: Gesamtheiten von gerichteten Einzelementen, die untereinander in Wechselbeziehung stehen und sich insgesamt durch den Austausch mit ihrer Umwelt erhalten.

Komplizierte Systeme: Gesamtheiten von vielen gerichteten Einzelementen, die untereinander durch viele verschiedene Wechselbeziehungen verbunden sind, welche insgesamt überschaubar und kalkulierbar sind.

Komplexe Systeme: Gesamtheit von variablen Einzelementen, die untereinander in variablen Wechselbeziehung stehen, welche nicht ober nicht abschliessend kalkulierbar sind und in unvorhersehbarer Weise auf das System selbst zurückwirken können.

2.8.2 Modell und Modellierung

Für das Gewinnen von wissenschaftlichen Erkenntnissen sind Modelle allgegenwärtig. Jedes Modell kann als Abbildung der Realität in einem bestimmten Massstab verstanden werden. Dem Modell liegt in der Regel ein Modellkonzept zu Grunde, das durch die Anwendung eines formalen Beschreibungsmittels zur Anwendung kommt. (SCHNIEDER 2009: 26)

Die Ausgestaltung des Modellbegriffs richtet sich nach dem Verwendungszweck des Modells. Die allgemeinen Merkmale und der Nutzen von Modellen im Gebiet der Eisenbahn ist in Absatz 1.6 dargestellt. GLINZ (2005: 29) zeigt auf, dass jedes Modell das Original aus der Perspektive einer bestimmten Sicht darstellt und damit die Wahrnehmung des Originals verändert. Gemäss SCHNIEDER (1999: 39-40) ist die Modellbildung die zentrale Methode im Zusammenhang mit Automatisierungssystemen, deren Komplexität als grösste Problematik dargestellt wird. Zusammen mit der Betrachtungsperspektive der verschiedenen Sichten und den daraus resultierenden Erwartungen entstehen zahlreiche Anforderungen, welche die verwendeten Modelle als Kommunikationsmittel für alle an der Entwicklung eines Automatisierungssystems beteiligten Personen erfüllen müssen.

Um die Sachverhalte und die Zusammenhänge des betreffenden Ausschnitts der Realität erfassen und darstellen zu können, werden geeignete Beschreibungsmittel angewendet. In seiner Arbeit unterteilt MEYER ZU HÖRSTE (2003: 17) die Beschreibungsmittel in drei Klassen:

1. Formale Beschreibungsmittel, welche eine vollständige mathematische Basis, eine definierte vollständige Syntax und eine eindeutige semantische Interpretation aufweisen,
2. Semi-formale Beschreibungsmittel mit definierter vollständiger Syntax und eindeutiger semantischer Interpretation, jedoch ohne vollständige mathematische Basis,
3. Informale Beschreibungsmittel, die ebenfalls Semiotik, Syntax und Semantik aufweisen, jedoch nicht grundsätzlich vollständig sind.

Das Beschreibungsmittel bildet eine unentbehrliche Basis für die Modellierung von Eisenbahnsystemen im Sinne dieser Arbeit: „Zur Formulierung der planmässigen Vorgehensweise, der Aufgabenstellung sowie zu deren Lösung und ihrer Realisierungsmittel und letztlich sogar zur Beschreibung von Anlagenzuständen und zur Bedienungshandhabung im Betrieb sind in jedem Fall Beschreibungsmittel essentielle Voraussetzung. Methoden und Werkzeuge zu ihrer Entwicklung sind nicht unbedingt notwendig.“ (SCHNIEDER, 1999:19)

Die oben genannten Merkmale von Modellen und Modellierung weisen auf die Schwierigkeit hin, eine allgemein gültige Definition für den Begriff des Modells herzuleiten. Nachstehend wird versucht, eine für diese Arbeit akzeptable und anwendbare Definition aufzustellen:

Modell: Abbildung eines Ausschnitts der Realität in einem bestimmten Massstab und zu einem bestimmten Zweck, die das Erfüllen von Anforderungen aus verschiedenen Sichten anstrebt.

Modellierung: Die Gesamtheit der Massnahmen und Tätigkeiten, welche die Herstellung einer Abbildung der Realität zu einem bestimmten Zweck anstrebt unter Anwendung eines Beschreibungsmittels und von spezifisch erhobenen und aufbereiteten Daten.

2.8.3 Dynamisches Modell in Raum und Zeit

Fahrzeuge und die Infrastruktur der Eisenbahn sind Veränderungen auf zwei Ebenen ausgesetzt: Kurzfristig verändert sich die Infrastruktur als ortsfestes Betriebsmittel, indem sie in ihre verschiedenen Zustände übergehen. So zum Beispiel zeigen Signale ihre verschiedenen Begriffe an, für welche sie ausgelegt sind. Fahrzeuge als mobile Betriebsmittel verändern zusätzlich zu den möglichen Zuständen (Stillstand, Beschleunigung, Fahrt usw.) den Ort, an dem sie sich befinden. Aus langfristiger Sicht sind konstruktive Veränderungen zu nennen, welchen sowohl Infrastruktur als auch Fahrzeuge ausgesetzt sind. Die Entwicklung der Technik ermöglicht Verbesserungen wie neue Signalsysteme, Fahrbahnkomponenten und Fahrleitungsbauarten sowie neue Assistenzsysteme in Triebfahrzeugen. Für die Modellierung sind die Veränderungen nach diesen

beiden Ebenen zu unterscheiden. Während die kurzfristigen Zustands- und Ortsveränderungen als dynamische Prozesse in die Modellierung einbezogen werden müssen, sind die langfristigen Veränderungen in erster Linie bei der Datenerhebung, mittels entsprechenden Attributen, die z.B. den Signal- oder Fahrzeugtyp zusammen mit der Anfangs- und Endzeit ihres Betriebs im System bezeichnen, zu berücksichtigen. Der Prozess der langfristigen Veränderungen von Anlagen und Rollmaterial kann kaum im Modell abgebildet werden, da dieser ein Bestandteil der Konstruktion und nicht des Eisenbahnbetriebs bildet. Dennoch ist es Untersuchungen über die technische und betriebliche Entwicklung der Eisenbahn, wie z.B. die Auswirkungen der Automatisierung an den Schnittstellen Mensch-Maschine, unerlässlich, dass die verschiedenen langfristigen Zustände von Infrastruktur und Fahrzeugen in den Modellen abgebildet werden können. Die Berücksichtigung dieser Dynamik auf zwei Ebenen hat zum Ziel, die Modelle als Basis für die Simulation von komplexen Problemstellungen zu verwenden. Simulationsmodelle werden bei der Eisenbahn für Sachverhalte verwendet, welche nicht oder nicht vollständig auf linearem Weg untersucht werden können. Dies betrifft typischerweise Fallstudien an den Schnittstellen Mensch-Maschine. MEYER ZU HÖRSTE/SLOVAK/SCHNIEDER (2001: 3) erklären, dass, um ein simulationsfähiges Modell schaffen zu können, ebenfalls eine Abbildung des gesteuerten Prozesses notwendig ist. Ferner ist der Transportprozess durch die Bereitschaft des stationären Betriebsmittels Fahrweg und durch die Dynamik des mobilen Betriebsmittels Fahrzeug repräsentiert.

Die dynamische Modellierung von Fahrweg und Fahrzeug kann unter Einbezug von Koordinaten, Vektoren sowie Algorithmen, welche ihre räumliche Ausdehnung, Funktion und Bewegung beschreiben, erfolgen. Infrastruktur und Fahrzeuge weisen im Rahmen ihrer eigenen Veränderungen im Zuge der Entwicklung jedoch auch eine zeitliche Ausdehnung auf: Sie beginnt zum Zeitpunkt ihrer Inbetriebnahme und endet zum Zeitpunkt ihrer Ausserbetriebsetzung.

Basierend auf diesen Erkenntnissen und der bisherigen Modelldefinition gemäss Absatz 2.8.2 wird versucht, eine hier gültige Definition abzuleiten:

Dynamisches Modell in Raum und Zeit: Abbildung eines veränderlichen Ausschnitts der Realität in einem bestimmten Massstab und zu einem bestimmten Zweck, die das Erfüllen von Anforderungen aus verschiedenen Sichten anstrebt unter Berücksichtigung der momentanen örtlichen und zeitlichen Ausdehnung einzelner oder mehrerer Systemelemente.

2.8.4 Simulation und Simulator

In der vorliegenden Arbeit werden bestehende Eisenbahnsimulatoren für wissenschaftliche Untersuchungen verwendet, was nicht ihrem bisher üblichen Verwendungszweck entspricht: Bis anhin werden Simulatoren bei der Eisenbahn fast ausschliesslich für die Ausbildung von Lokführern - seltener auch von Zugverkehrsleitern - eingesetzt. Christiane SPATH (2009: 41) hat in ihrem Werk die Herkunft und Geschichte der Begriffe der Simulation und des Simulators untersucht und ist zur Erkenntnis gelangt, dass sich nur wenige Wissenschaftstheoretiker und Philosophen mit der Aussagekraft der Simulationen für die Wirklichkeit beschäftigen. Dabei sei nicht erkennbar, ob diese Eigenschaft nicht gefordert oder ob sie als so selbstverständlich angesehen wird, dass sie nicht erwähnt werden muss. In diesem Sinne verweist sie auf die Definition der VDI-Richtlinien: „simulieren: nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind.“ Aus der Perspektive des noch relativ jungen und eher seltenen Einsatzes von Simulatoren bei der Eisenbahn wird vermutet, dass der in der Praxis anwendbare Erkenntnisgewinn auf Grund von Experimenten mit Simulatoren bisher keinen Anspruch darstellt, sondern dass die Anlagen ausschliesslich aus wirtschaftlichen, didaktischen und sicherheitstechnischen Überlegungen eingesetzt werden.

Günter KÜPPERS, Johannes LENARD und Terry SHINN mit ihrem Einführungssessay des *Sociology of the Science Yearbook 2006* (KÜPPERS/LENARD/SHINN 2006: 6), unter dem Titel *Simulation - Pragmatic Construction of Reality* eine für die vorliegende Arbeit sehr interessante Erkenntnis aufzeigt: „Weiter gehen die Autoren der Frage nach, was beim Erfolg von Simulationen in Wissenschaft und Technik ausschlaggebend war und nennen dabei vier Merkmale:

- sie ermöglichen das Handhaben komplexer Probleme,
- sie können Zusammenhänge darstellen und Dinge sichtbar machen, die mit dem normalmenschlichen Wahrnehmungsvermögen nicht erfassbar sind,
- die immer größere Leistungsfähigkeit von Computern und Computersprachen erleichtern das Arbeiten mit Simulationen, auch für Nicht-Computerexperten,
- die Fortschritte in Punkt drei weiten die Anwendungsmöglichkeiten auf viele Gebiete aus, so dass Simulationen kein Nischenwerkzeug für wenige Spezialgebiete mehr sind.“

Vor diesem Hintergrund wird ersichtlich, dass beim Einsatz von Simulatoren im Umfeld der Eisenbahn und der relativ jungen Automatisierungsgeschichte in der Betriebsführung ein hohes Potential besteht. Diese hypothetische Feststellung wird gestützt durch die Tatsache, dass Simulatoren im Zusammenhang mit Verkehr in der Literatur in der ersten Linie mit der Luft- und Raumfahrt, seltener jedoch mit der Eisenbahn in Verbindung gebracht wird. Erst die Entwicklung von neuen elektronischen, simulationsbasierten Instrumenten liessen den Begriff im Alltag der jüngsten Vergangenheit im Umfeld der Eisenbahn in Erscheinung treten.

Die Verbindung des Begriffs der Simulation, bzw. des Simulators mit Computer bzw. Rechner darf nicht darüber hinweg täuschen, dass es im vorliegenden Zusammenhang vor allem um experimentelle Simulationen geht. Somit sind Computer und Rechner hier als Mittel zum Zweck zu betrachten, damit die Simulationsinstrumente ihren Zweck erfüllen und bilden somit nicht expliziten Bestandteil der Simulation.

Die Wahrnehmung und Verwendung der Begriffe „Simulation“ und „Simulator“ in der Literatur lassen vermuten, dass sich die Forschung insbesondere im Bereich der Eisenbahn erst seit relativ kurzer Zeit diesem Thema zuwendet. Auf Grund der oben genannten Feststellungen und in Anlehnung an die Richtlinie VDI 3633 (SPATH 2009: 41) wird hier zu definiert:

Simulation: Nachbildung einer Gesamtheit von Prozessen eines Systems oder Teilsystems, mit oder ohne direktem Einbezug von menschlichen Handlungen und auf der Basis von dynamischen Modellen mit dem Ziel, auf mathematischem oder empirischen Weg zu Erkenntnissen zu gelangen, welche sich in die Realität übertragen lassen.

Simulator: Physisches Instrument in einem bestimmten Massstab bzw. Detaillierungsgrad, mit welchem sich basierend auf dynamischen Modellen Simulationen durchführen lassen.

2.9 Systembeschreibung

Im Rahmen dieser Arbeit soll versucht werden, ein dynamisches Eisenbahn-Systemmodell mit seinen repräsentativen Einflussfaktoren und vor dem Hintergrund der übergeordneten Zielsetzung, seine Lebensfähigkeit zu erhöhen, zu beschreiben. (VESTER 2005: 192) Dabei soll man das Eisenbahnsystem vor dem Hintergrund eines kybernetischen Systems verstehen können, um daraus Sensitivitäten und Möglichkeiten für die Optimierung zu erkennen. An dieser Stelle erscheint es wichtig, dass die zu definierenden, untergeordneten Teilziele unter Einbezug von Personen ge-

schiebt, die von späteren Entscheidungen betroffen sind. In dieser Arbeit wird versucht, diesem Umstand einerseits durch Fallstudien auf Fahrsimulatoren, andererseits durch Befragung von relevantem Personal (Lokführer) sowie durch Experteninterviews gerecht zu werden.

Aus dem kybernetischen Ansatz geht die Notwendigkeit hervor, für die Gestaltung eines Eisenbahn-Systemmodells Überlegungen zu den übergeordneten Zusammenhängen anzustellen und die Komplexität des Gesamtsystems auf repräsentative Schlüsselfaktoren zu reduzieren. Als Systemelemente treten nebst den Infrastrukturobjekten (Unter-/Oberbau, Sicherungsanlagen, elektrischen Anlagen) und dem Betrieb (Fahrplan, Züge, Betriebsführung) die einzelnen Fachbereiche aus der Umwelt auf. Letztere lassen sich in die Bereiche Naturraum, Kulturraum, Atmosphäre, Geosphäre sowie Schnittstellen gliedern. Alle Systemelemente bilden zusammen ein Wirkungsgefüge. Die zwei wesentlichen Funktionen des Eisenbahn-Systemmodells bestehen aus der Visualisierung der Objekte in Raum und Zeit sowie der Lieferung von Daten über die Schweizer Eisenbahnen für beliebige Zeitpunkte oder -intervalle als Basis für Untersuchungen mittels spezifischer, simulationsfähiger Werkzeuge.

Die Darstellung in Abbildung 19 dient der Übersicht über die für diese Arbeit relevanten Systemelemente. Der Begriff der Systemabgrenzung ist nur mit besonderer Vorsicht anzuwenden oder zu vermeiden, da es sich bei der Eisenbahn um ein offenes System mit unzähligen Wechselwirkungen zu ihrer Umwelt handelt. Die Abgrenzung dieses Systems ist deshalb nur dann zulässig, wenn die grenzüberschreitenden Wechselbeziehungen mit berücksichtigt werden, was Betrachter und Anwender des entsprechenden Systems vor grosse Herausforderungen stellt. Aus der Perspektive eines technischen Systems hingegen stellt die Systemabgrenzung eine Grundlage für die Anwendung von Beschreibungsmitteln dar. Die Abgrenzung des Systems bezieht sich dabei ausdrücklich auf die automatisierungstechnischen sowie maschinen- oder rechnergesteuerten Prozesse mit dem Ziel der Entwicklung der entsprechenden Anlage, auf die sich die Beschreibung bezieht. Dieser wichtige Unterschied in der Betrachtung eines technischen Systems gegenüber der kybernetischen Systembetrachtung geht auch aus dem Bereich der Prozessinformatik anhand folgender Aussage hervor: „Als Hilfsmittel zur formalen Behandlung rechnergesteuerter Prozesse können folgende mathematische Methoden verwendet werden: Netztheorie (Instanzen- und Petrinetze), lineare Systemtheorie, Theorie stochastischer Prozesse, Boolesche Algebra.“ (SCHNIEDER 1993: 7)

Für die Systembeschreibung eignen sich grundsätzlich die im Abschnitt 2.4 vorgestellten Petrinetze, da sie eine gute Möglichkeit darstellen, Zustände und Zustandsübergänge ereignisdiskret zu modellieren. (MÖHLENBRINK 2010: 40) Petrinetze ermöglichen durch ihre statische Netzstruktur die implizierte Modellierung der Dynamik, woraus sich durch rein formale Handhabung die expliziten Zustandsmengen dynamischer Abläufe ermitteln lassen. (SCHNIEDER 1999: 63)

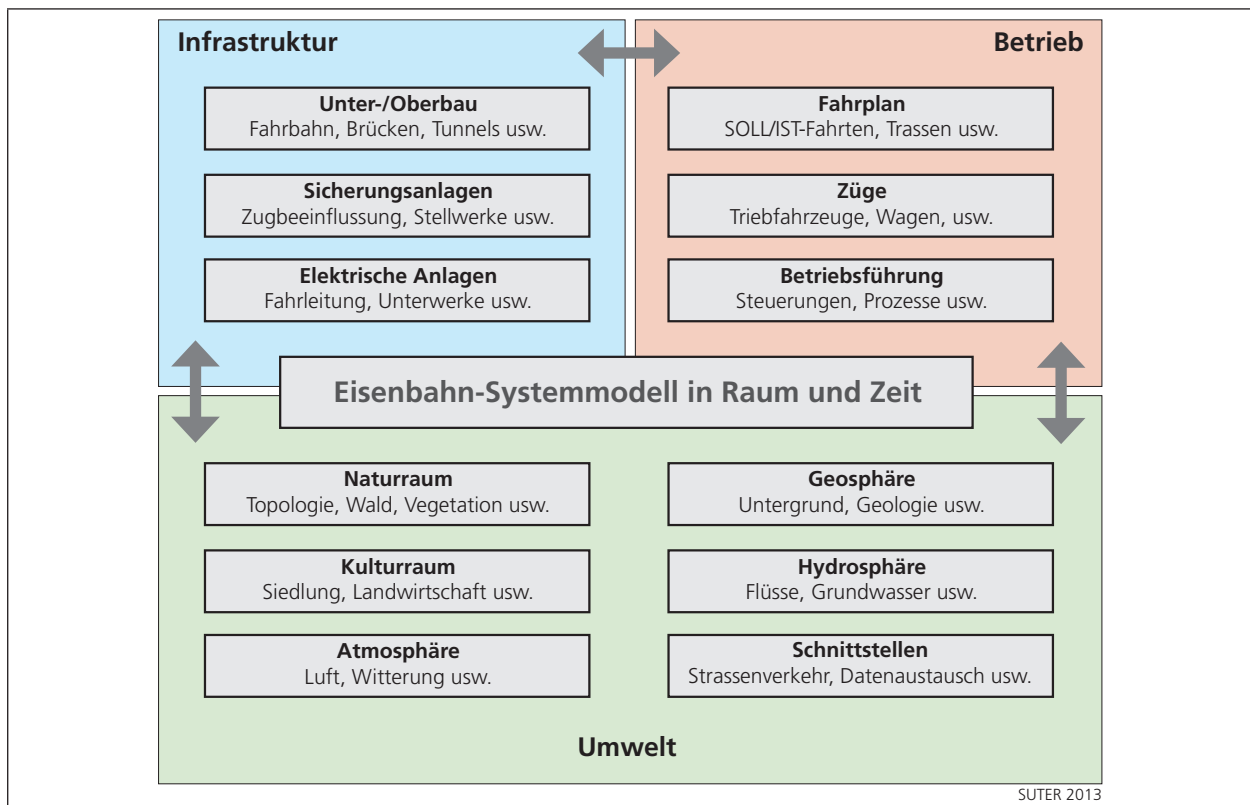


Abbildung 19: Entwurf der repräsentativen Elemente eines Eisenbahn-Systemmodells.

Für die Beschreibung des vorliegenden Eisenbahn-Systemmodells deckt die lineare Systemtheorie nicht alle Bereiche ab, da einige Funktionen im System nicht auf linearem Weg erfasst und abgebildet werden können. Dies gilt beispielsweise an den Schnittstellen Mensch-Maschine und an den kausalen Gesetzmässigkeiten für die Erfassung von Verkehrsaufkommen, deren Prozesse sich oft nicht auf mathematischem Weg herleiten lassen. Demnach sollten im Eisenbahn-Systemmodell die kybernetischen und rein technischen Teilsysteme auseinander gehalten werden.

2.10 Zusammenfassung und Fazit zu den methodischen Ansätzen

Aus den theoretischen Grundlagen dieser Arbeit geht hervor, dass bei Untersuchungen im Eisenbahnwesen die Wechselwirkungen zwischen den Systemelementen berücksichtigt werden müssen. Nicht messbare Einflussfaktoren sind oft an den Schnittstellen Mensch-Maschine vorhanden. Diese Faktoren können mit qualitativen und quantitativen Methoden untersucht werden. Im Gegensatz zum Flugverkehr scheint im Eisenbahnwesen die Forschung hinsichtlich Fragen im Zusammenhang mit Human Factors noch nicht sehr weit entwickelt zu sein.

Die Ausführungen dieses Kapitels zeigen auf, dass heute die Herausforderungen bei der Modellierung von technischen Systemen vor allem bei der Inwertsetzung der erhobenen Daten liegen. Die bei den - im schweizerischen Schienennetz über 60 verschiedenen - Infrastrukturbetreibern gesammelten und gehaltenen Daten liegen in völlig unterschiedlichen Formen vor, womit sich die Aufbereitung der Daten oft sehr aufwändig gestaltet.

Abbildung 20 versucht, den Prozess bezüglich der in Abschnitt 1.7 hergeleiteten vier Arbeitsschritte Datenerhebung, Datenaufbereitung, Systemmodellierung und Anwendung der Simulationsmodelle zusammen mit den dieser Arbeit zu Grunde liegenden Instrumenten als Wirkungsgefüge darzustellen. Das Instrument „QRailScan“ erlaubt eine einfache Form der Neuerhebung von Daten, basierend auf Videoaufnahmen. Unter Anwendung photogrammetrischer Methoden könnte die Erfassung signifikanter Objekte auf der Strecke, wie z.B. Signale, teilweise automatisch erfol-

gen. Es ist zudem möglich, die Daten aus QRailScan so aufzubereiten, dass sie im Standardformat railML vorliegen. Damit könnten einheitliche Schemata angewendet werden, was den Datenaustausch vereinfacht. Die erhobenen Daten werden einerseits für die Anwendung eines geeigneten Beschreibungsmittels benötigt, andererseits fließen sie in die Middleware der Simulationsmodelle ein. Sie werden jedoch auch für die Modellierung der Stellwerklogik sowie des Geländemodells der Fahrsimulatoren benötigt. Die Middleware kommuniziert sowohl mit den Fahrsimulatoren als auch den Stellwerkmodellen.

In den Stellwerk- und Fahrsimulationsprogrammen werden die Daten jeweils modelliert bis sie in Form von integrierten Simulationen zur Anwendung gelangen. Daraus gehen die Erkenntnisse hervor, welche in die schliesslich vorangehenden Arbeitsschritte Systemmodellierung, Datenaufbereitung und Datenerhebung zurück fließen sollen.

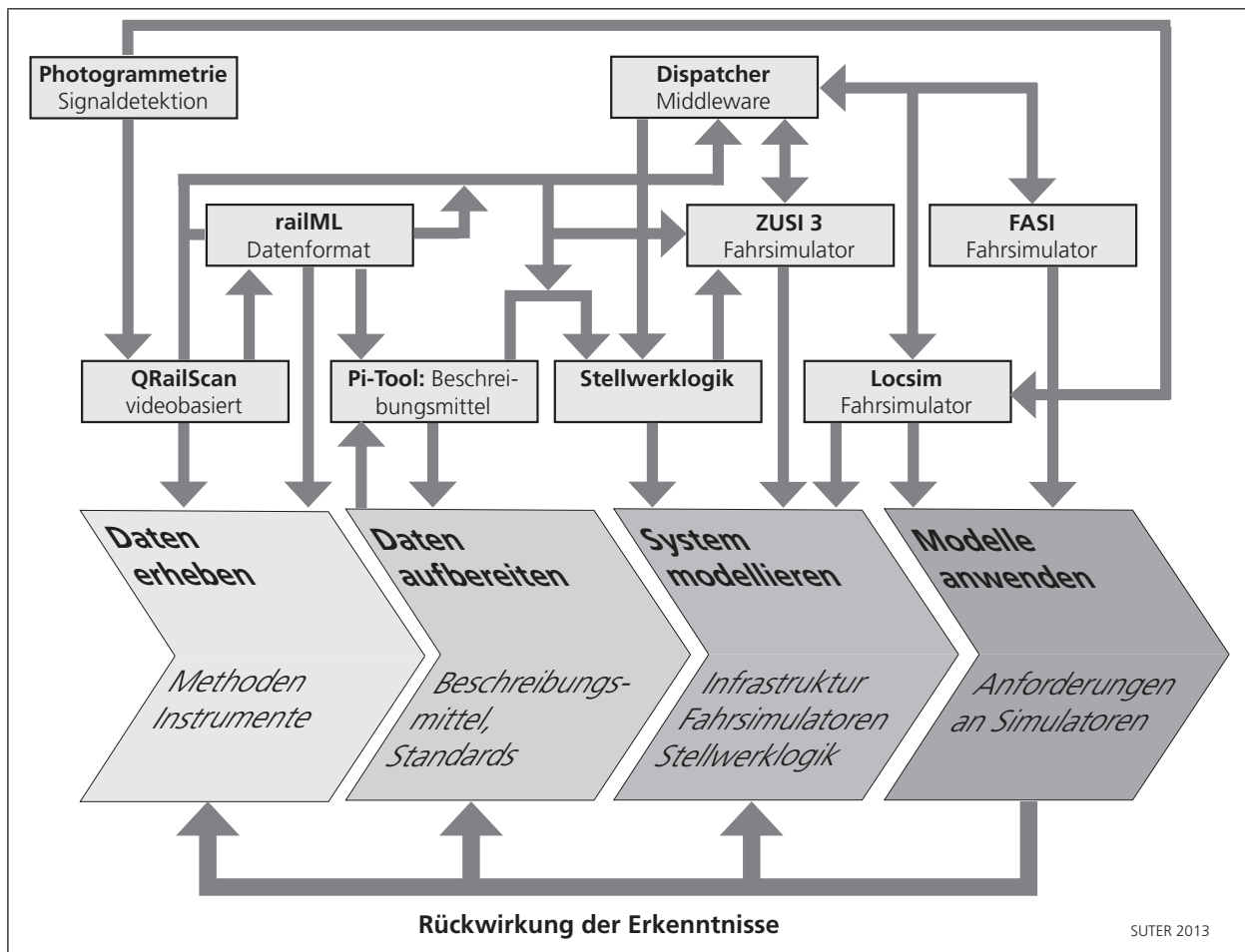


Abbildung 20: Untersuchung der wesentlichen Arbeitsschritte dieser Arbeit nach Abbildung 5 vor dem theoretischen Hintergrund.

Diese gesamtheitliche Betrachtung mit Wirkungsgefüge zeigt die Notwendigkeit, Datenerhebung, Datenaufbereitung, Systemmodellierung und Anwendung der Simulationsmodelle im Kontext als zusammenhängenden Prozess zu betrachten, da die jeweils verwendeten Instrumente an ihren Schnittstellen aufeinander abgestimmt werden müssen. Aus systemischer Sicht ist es nicht zulässig, einzelne Systemelemente isoliert zu betrachten und zu untersuchen, ohne dabei die Wechselwirkungen mit anderen Elementen und mit ihrer Umwelt mit einzubeziehen. In der Praxis ist eine gesamtheitliche Betrachtung auf Systemebene aus Aufwandgründen oft nicht möglich.

Die vorliegende Arbeit versucht im Gebiet des Eisenbahnsystems einen Beitrag zu leisten, um in diesem Sinne einen kleinen Schritt weiter zu kommen und Untersuchungen unter Berücksichtigung eines umfangreicheren Wirkungsgefüges durchführen zu können.

2.10.1 Umgang mit komplizierten und komplexen Systemen

Das traditionelle allgemeine Verständnis der Eisenbahn vermittelt vor allem Bilder von Technik und technischen Prozessen. Im Vordergrund dabei stehen etwa Lokomotiven und Züge, Signalanlagen, Kunstbauten der Fahrbahn usw. So werden vor allem Berufe mit vorwiegend technischem Hintergrund, wie Ingenieure und Techniker, mit der Eisenbahn in Verbindung gebracht. Die Eisenbahn steht für Zuverlässigkeit und Präzision - kaum jemand würde Prozesse, die nicht berechenbar sind und deren Verlauf nicht im Voraus bestimmt werden kann, in erster Linie der Welt der Eisenbahn zuordnen. Der Begriff der Komplexität hingegen passt schon eher ins Konzept, da man sich vorstellen kann, dass es innerhalb der Eisenbahnbetriebsführung eine grosse Zahl von Abhängigkeiten und Nebenbedingungen gibt, um vor allem die Sicherheit der Züge jederzeit kontrollieren zu können.

An dieser Stelle wird versucht, sich dem Begriff des komplexen Systems im Zusammenhang mit der Eisenbahn weiter anzunähern. Nach NINCK/BÜRKI/HUNGERBÜHLER/MÜHLEMANN (2004: XIff) zeichnen sich komplexe Systeme „dadurch aus, dass sie auf sich selber zurückwirken. Dadurch werden selbstorganisatorische Effekte und Veränderungen in Gang gesetzt, welche nicht mehr einfach voraussagbar sind.“ Sie setzten den Begriff „Systemik“ generell mit systemischem Denken gleich, wonach Problemstellungen jeweils als vernetzte, dynamische Ganzheit, die mit ihrer Umwelt in Wechselbeziehung stehen, aufzufassen seien. Der Begriff der Systemik sei auch Ausdruck der Tatsache, dass heute im Bereich Technik und Management vorwiegend komplexe Probleme zu lösen seien und diese nicht mit klassischen Engineering-Ansätzen angegangen werden könnten. Nach dem sich diese klassischen Ansätze vorwiegend quantitativer Methoden bedienen, fliessen mit der Systemik vermehrt auch qualitative Methoden in die Welt der Ingenieure ein. Die Überzeugungsarbeit für die Anwendung der Systemik ist offensichtlich nicht einfach, auch wenn sie in Forschung und Wirtschaft zunehmend an Akzeptanz zu erlangen scheint.

VESTER (2002: 36ff) zeigt in seinem Werk über die Kunst, vernetzt zu denken, sechs grundsätzliche Fehler im Umgang mit komplexen Systemen auf, welche oft und nachweislich zu Fehlentscheidungen führen. Daraus hervor geht die Unzulässigkeit, die Entschlussfassung durch bewusstes Ausblenden der Komplexität vereinfachen zu wollen: „Bei allen Fehlplanungen liegt das Hauptproblem offensichtlich darin, dass zwar immer qualifizierte Experten herangezogen werden, deren Qualifikation aber an den Grenzen ihres jeweiligen Faches aufhört. Von dem, was über ihr Fachgebiet hinausgeht, haben sie meistens wenig Ahnung - ganz zu schweigen davon, dass sie einen Überblick über die kybernetischen Zusammenhänge ihres Projekts besässen.“ (VESTER 2002: 39). Dazu stellen auch NINCK/BÜRKI/HUNGERBÜHLER/MÜHLEMANN (2004: 52-53) fest, dass die Analyse einzelner Teile eines komplexen Systems wenig bringt, wenn dabei die Beziehungen zwischen den einzelnen Teilen nicht erkannt werden. Es wäre auch vermessen zu glauben, durch Kenntnis der Wechselbeziehungen in einem komplexen System wäre die Beherrschbarkeit gegeben. Dazu ziehen sie als Vergleich ein Fussballspiel herbei, bei welchem alle Nebenbedingungen, Spieler und Spielregeln bekannt sind - der Spielausgang dennoch nicht im Voraus bestimmt werden kann. Es kann höchstens versucht werden, das System durch gezielte Eingriffe zu beeinflussen, nachdem die Systemelemente auf ihre Lenkbarkeit genau untersucht wurde.

2.10.2 Eigenschaften von komplizierten und komplexen Problemen

Die Tabelle 4 verdeutlicht die unterschiedlichen Charakteristiken von komplizierten und komplexen Problemstellungen. Um komplexe Problemstellungen zu analysieren, müssen vorerst die Wirkungszusammenhänge verstanden werden. Die Ergebnisse von Analysen komplexer Probleme lassen sich in einem Koordinatensystem grafisch darstellen und interpretieren.

	kompliziertes Problem	komplexes Problem
Struktur	linear-kausale Abhängigkeiten	vernetzte Abhängigkeiten
Gefahr	Das System verliert an Produktivität	Das System verliert an Lebensqualität
Analyseansätze	Suche nach Ursachen Analyse gibt Aufschluss über Störungen	Verstehen der Wirkungszusammenhänge Analyse zeigt problematische Grundmuster
Problemlösung	Reparieren der gestörten Wirkungskette	Gestaltungsimpulse geben

SUTER 2013

Tabelle 4: Charakteristik von komplizierten und komplexen Problemen im Vergleich (NINCK/BÜRKI/HUNGERBÜHLER/MÜHLEMANN 2004: 63, abgeändert)

Im nachfolgenden Kapitel wird, auf der Basis der bisherigen Erkenntnisse durch die Annäherung an den Begriff der Komplexität, die Eisenbahn aus systemischer Sichtweise analysiert, um daraus Anforderungen an die Modellierung abzuleiten.

3. Theoretische Analysen

Nach dieser Einführung über die methodischen Grundlagen wird das Eisenbahnsystem in den folgenden Abschnitten im Hinblick auf die in der Einführung zu Kapitel 1 vorgestellten vier Problematiken **A** bis **D** analysiert. Dabei entstehen folgende, offensichtlich nicht abschliessend auf mathematisch-analytischem Wege lösbaren Fragestellungen:

- Im Zuge der technischen Entwicklung können oft nicht alle Sicherheitslücken ausgeschlossen werden. Wie kann man solche Lücken erkennen?
- Im Zuge der Automatisierung wird der Mensch vom Bediener zum Überwacher. Wie kann man Grenzen der Automatisierung erkennen?
- Welche Problemstellungen resultieren aus der technischen Entwicklung bei der Betriebsführung der Bahn?
- Wie können gefährliche Auswirkungen menschlichen Handelns auf der Systemebene erkannt und behoben werden?

3.1 Erkennen von Schwachstellen im Regelwerk (vgl. Kapitel 1: **A**)

Die zunehmend hohe Zahl von Wechselwirkungen im Eisenbahnsystem erschwert es, dass beim Erlass, Erneuern und Ergänzen von Reglementen, Vorschriften und Gesetzen alle unerwünschten Nebeneffekte im Voraus erkannt werden können. Regulatorische Schwachstellen werden oft erst in der Praxis anhand von Vorkommnissen und Ereignissen entdeckt.

3.1.1 Verwechslungsgefahr bei Sammelbefehlen

Als Beispiel gilt die bereits in Abschnitt 1.5.1 erwähnte Verwechslungsgefahr bei der betrieblichen Bewältigung von Signal- und Stellwerkstörungen. Im Falle einer Signalstörung gibt es unter anderem die Möglichkeit, dem Lokführer einen Befehl für die Vorbeifahrt am Halt zeigenden Hauptsignal zu übermitteln. Gemäss Schweizer Fahrdienstvorschriften ist ein solcher Befehl protokollpflichtig, das heisst, der Lokführer muss diesen Befehl des Zugverkehrsleiters nach einem festgelegten Prozess auf einem sogenannten Sammelformular notieren und über Funk/Telefon bestätigen. Nach Abschluss dieses Prozesses trifft der Lokführer die notwendigen Massnahmen und fährt am Halt zeigenden Signal vorbei. Aus Sicherheitsgründen wurden die Fahrdienstvorschriften dahingehend ergänzt, dass bei der Vorbeifahrt an Halt zeigenden Hauptsignalen generell bis zum nachfolgenden Hauptsignal mit „Fahrt auf Sicht“ (Geschwindigkeit, die das Anhalten auf Sichtdistanz erlaubt, höchstens 40 km/h) gefahren werden muss. Umgekehrt kann der Zugverkehrsleiter im Bedarfsfall dem Lokführer auf einer bestimmten Strecke den Befehl „Fahrt auf Sicht“ anordnen, wenn zum Beispiel am Stellwerk eine Gleisfreimeldung gestört ist. Dabei wird wiederum das erwähnte Sammelformular verwendet. Auch dieser Befehl ist protokollpflichtig, das Prozedere läuft im gleichen Sinne wie oben beschrieben ab. Da der Lokführer den Befehl nicht während der Fahrt entgegennehmen kann, erfolgt die Übermittlung typischerweise dann, wenn der Zug vor einem Halt zeigenden Hauptsignal zum Stillstand gekommen ist. Zusammenfassend kann man festhalten: Erhält der Lokführer einen protokollpflichtigen Befehl für die Vorbeifahrt bei Halt zeigendem Hauptsignal, gilt gemäss Fahrdienstvorschriften „Fahrt auf Sicht“ bis zum nächsten Hauptsignal. Erhält der Lokführer jedoch einen protokollpflichtigen Befehl für „Fahrt auf Sicht“, gilt dieser nicht für die Vorbeifahrt am Halt zeigenden Hauptsignal! Aus theoretischer Sicht erscheint es völlig klar, dass zwischen diesen beiden unterschiedlichen Befehlen kein Zu-

sammenhang besteht, der zu Verwechslungen führen könnte. Dennoch hat es sich in der Praxis gezeigt, dass die Verbindung der erwähnten Prozesse für die Lokführer gefährlich werden kann. Im Jahr 2012 wurden dem Bundesamt für Verkehr acht Fälle gemeldet, nachdem Lokführer in einer solchen Situation irrtümlich am Halt zeigenden Hauptsignal vorbei gefahren sind. (BUNDESAMT FÜR VERKEHR, 2013b: 6) Dies kann als eindruckliches Beispiel angesehen werden, wie die Komplexität im Eisenbahnsystem gefährliche Rückwirkungen auslösen kann.

Solche Umstände sind weder quantitativ messbar, noch können sie vor dem Eintreten eines Ereignisses zuverlässig erkannt werden.

Simulationsbasierte Modelle können jedoch helfen, die Auswirkungen solcher Schwachstellen unter Umständen zu erkennen, bevor eine Gefährdung oder gar ein Unfall eintritt. Voraussetzung dafür sind eine detaillierte Auflösung der Infrastrukturmodellierung sowie die genaue Abbildung der betrieblichen Prozesse. Zusammen mit der Berufserfahrung des Personals können so Szenarien simuliert und so lange wiederholt werden, bis ein statistisch repräsentatives Ergebnis vorliegt.

3.1.2 Verwechslungsgefahr bei Gruppensignalen

Ein weiterer Aspekt, der die Komplexität und mögliche Folgen im Zusammenhang mit der Abfolge von Wahrnehmung, Entscheidung und Handlung aufzeigt, ist das punktuelle Auftreten von Schwachstellen im Eisenbahnbetrieb, bei welchen technische und betriebliche Rückfallebenen fehlen, womit ein einfacher menschlicher Fehler genügt, um eine Zuggefährdung herbei zu führen. Auch solche Umstände sind auf mathematisch-analytischem Weg nicht oder nur schwer kontrollierbar, bzw. erkennbar. Dazu sei an dieser Stelle ein Beispiel erwähnt: Die im Jahre 2004 neu gebaute Sicherungsanlage im Bahnhof Thun weist eine Besonderheit auf. Eines der Hauptsignale ist als sogenanntes Gruppensignal ausgeführt, welches in Haltstellung für zwei zusammenführende Gleise gilt. In Fahrtstellung gilt es wahlweise für das eine oder für das andere Gleis. In den Fahrdienstvorschriften FDV ist diese Situation wie folgt geregelt: (BUNDESAMT FÜR VERKEHR, 2012: 376) „Die Zustimmung zur Fahrt bei Fahrt zeigendem Gruppensignal gilt bei folgender Zusatzsignalisierung:

- Gruppensignal-Halttafel mit beleuchtetem Fahrtstellungsmelder oder
- Gruppensignal-Halttafel mit Fahrbegriffstafel. Der Fahrbegriff des Gruppensignals und derjenige der Fahrbegriffstafel müssen übereinstimmen oder
- Fahrt zeigendes Zwergsignal oder dem zugehörigen Gleis entsprechend beleuchtetes Gleisnummernsignal oder
- dem zugehörigen Gleis entsprechend beleuchteter Hinweis Pfeil Gruppensignal.

In Anlagen mit Zwergsignalen und Fahrtstellungsmeldern muss das Zwergsignal Fahrt zeigen und der Fahrtstellungsmelder beleuchtet sein.“

Zum Verständnis der Beispielsituation ist zu erwähnen, dass die Sicherungsanlage des Bahnhofs Thun über Zwergsignale verfügt. Es handelt sich dabei um Signale für den Rangierbetrieb, welche in der Schweiz auch bei Zugfahrten zu beachten sind. Vor der Weiche, welche die beiden Gleise zusammen führt, sind solche Zwergsignale aufgestellt, welche die Zustimmung zur Fahrt in Verbindung mit dem Gruppensignal regeln. Fahrdienstvorschriften sehen weder die besondere Kennzeichnung der Gruppensignale noch eine sich überlagernde Verwendung der Zustimmung zur Fahrt (z.B. Zwergsignale zusammen mit Gruppensignal-Halttafel) vor. Dies führt in seltenen Fällen dazu, dass - wie einleitend beschrieben - eine einfache Fehlinterpretation des Lokführers

genügt, um eine gefährliche Situation zu bewirken. In den Abbildungen Abbildung 21 bis Abbildung 23 ist folgende Situation im Bahnhof Thun am 24. November 2011 schematisch dargestellt: Der Zugverkehrsleiter hat den Lokführer des vor dem Gruppensignal wartenden Güterzugs 48607 über die voraussichtliche Abfahrtszeit um 22:33 Uhr informiert. Eine Baustelle an der Gleisanlage sowie eine geringfügige Verspätung des Intercity-Zugs 991 haben bewirkt, dass das Gruppensignal zur fraglichen Zeit nicht für den Güterzug, sondern für den voraus fahrenden und leicht verspäteten Intercity-Zug auf Fahrt gestellt wurde. Einzig das Missachten des Zwergsignals durch den Lokführer des Güterzugs hat zu einem Beinaheunfall geführt. In der Überzeugung, das Gruppensignal gelte für ihn, fuhr er mit seinem Zug auf die Strecke Richtung Spiez - Lötschberg. Seinen Irrtum hat er auch nach dem Aufschneiden der Weiche nicht bemerkt - das Gruppensignal wurde (gemäss Spezifikation der Sicherungsanlage korrekterweise) nicht auf Halt zurück gestellt und somit auch keine Zwangsbremmung ausgelöst. Der Lokführer des Intercity 991 hat in seinem Fahrweg das Zurückstellen des Zwergsignals auf Halt bemerkt, den ausfahrenden Güterzug gesehen und konnte seinen Zug noch vor dem Gefahrenpunkt anhalten.

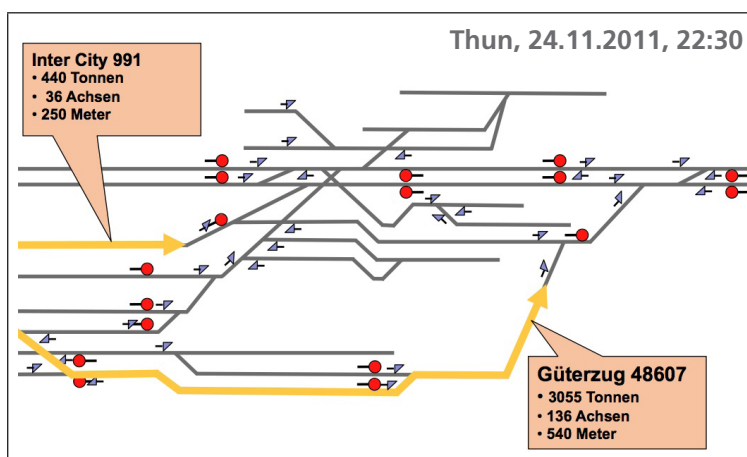


Abbildung 21: die zwei zur Abfahrt bereiten Züge, wobei IC 991 einige Minuten zu spät verkehrt. Güterzug 48607 wartet vor dem einzigen Gruppensignal dieses Bahnhofs.

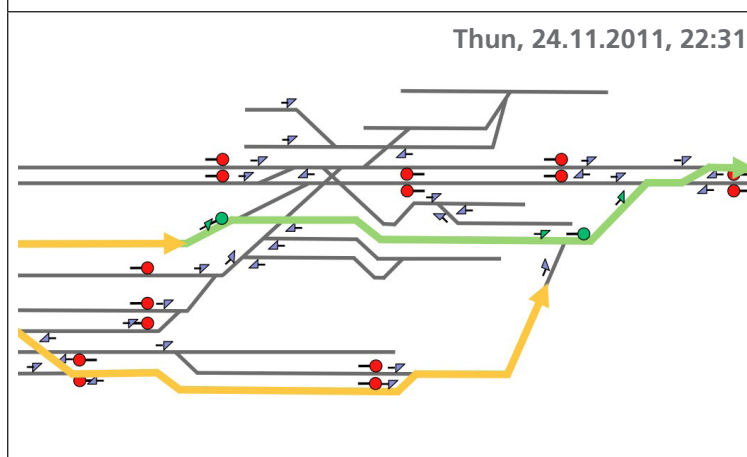


Abbildung 22: In Folge einer Baustelle kann der IC nicht die gewohnten Gleise für die Ausfahrt aus dem Bahnhof benützen.

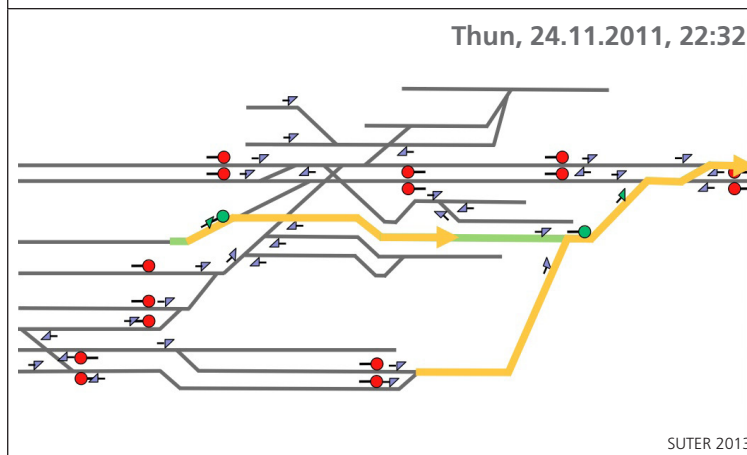


Abbildung 23: Als das Signal für IC 991 Fahrt zeigt, ist dem Lokführer des Güterzugs nicht bewusst, dass es nicht für ihn gilt.

In den Abbildungen sind die Hauptsignale als runde Symbole (rot bzw. grün), die Zwergsignale als Dreieckssymbol (blau, bzw. grün) darstellt.

Im Zuge der Entwicklung der Signalisierung vor dem Hintergrund der Automatisierung ist es daher denkbar, dass Lokführer und Zugverkehrsleiter mangels genügender Systemkenntnisse ihre Verantwortung punktuell nicht wahrnehmen können.

3.1.3 Interpretation subjektiver Wahrnehmung mittels Modellen

Das Ausbleiben eines Ereignisses oder Unfalls bleibt dem Zufall überlassen. Aussagen aus der Berufserfahrung des Personals stellen oft Hypothesen dar, welche auf Grund zahlreicher Wechselwirkungen und mangels Instrumenten nicht ohne weiteres untersucht werden können. Dabei kann es sich beispielsweise um Meldungen über angeblich falsch aufgestellte Signale handeln, wobei die Auslegung von „falsch“ der subjektiven Wahrnehmung der Verantwortlichen überlassen bleibt. Auch in dieser Hinsicht können Modelle helfen, Schwachstellen wie im oben geschilderten Fall rechtzeitig zu erkennen und nachzuweisen. Die Anwendung von Modellen kann auch Ansätze auf Systemebene aufzeigen, welche die Auslegung von Signalisierung, Vorschriften und Regeln unterstützen.

3.2 Komplexität bei der Untersuchung von Ereignissen (vgl. Kapitel 1: **A**)

Komplizierte technische Gegebenheiten können durch die Einwirkung menschlicher Wahrnehmung, Entscheidung und Handlung zu komplexen Systemen werden. Dabei entstehen bei betrieblichen Abläufen Rückwirkungen, die nicht im Voraus bestimmbar oder kontrollierbar sind. Die Tabelle 4 zeigt die Charakteristik von komplizierten und komplexen Problemen im Vergleich nach NINCK/BÜRKI/HUNGERBÜHLER/MÜHLEMANN. Daraus geht hervor, dass sich die Ansätze für die Analyse grundsätzlich unterscheiden. Währenddem sich komplizierte Probleme mittels Suche nach Ursachen untersuchen lassen, spielt bei komplexen Problemen das Verstehen der Wirkungszusammenhänge eine zentrale Rolle. Daraus geht hervor, dass bei letzteren Problemen die quantitativen Methoden nicht zu genügen vermögen. In seinem Werk über die Kunst, vernetzt zu denken, zeigt VESTER Methoden auf, welche es erlauben, die Wirkungszusammenhänge komplexer Systemen zu verstehen.

3.2.1 Definition des Begriffs des Ereignisses

Unter Ereignis wird in der vorliegenden Arbeit, angelehnt an die Schweizerische Unfalluntersuchungsverordnung (SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT 2000: 2), ein Vorfall verstanden, welcher mindestens eine der folgenden Konsequenzen hat:

- tödliche oder schwere Verletzung einer Person,
- Sachschaden, der den Betrag von CHF 100 000.-- übersteigt,
- Freisetzung von gefährlichen Gütern,
- beinahe zu einem Unfall geführt hätte.

Bei der Untersuchung von Ereignissen im Eisenbahnverkehr stehen verständlicherweise die technischen und messbaren Faktoren sowie nachvollziehbare betriebliche Prozesse im Vordergrund. Fehlhandlungen und menschliches Versagen sind dabei leicht festzustellen – nicht jedoch deren ursächlichen Zusammenhänge. Es ist oft schwierig, technisches und menschliches Versagen klar auseinander zu halten. In der Regel handelt es sich um eine komplexe Vernetzung technischer, organisatorischer, betrieblicher und menschlicher Faktoren. Menschliche Faktoren sind nicht nur als Ursache, sondern auch als Symptom für latente Schwächen im System zu betrachten. (HAMMERL/FELDMANN 2009: 318) Auswertungen aus der Luft- und Raumfahrt zeigen, dass die dort

beobachteten indirekten Ursachen in die drei Kategorien *Schwächen in der Sicherheitskultur, ineffektive Organisationsstruktur und Kommunikation* sowie *ineffektive oder ungeeignete technische Massnahmen* unterteilt werden können. Diese Untersuchungen sollen verdeutlichen, dass Fehler selten nur beim Menschen zu finden sind und dass bei der Optimierung der betrieblichen Sicherheit immer das Zusammenwirken von Mensch und Technik betrachtet werden sollte. (BRABAND 2011: 14)

3.2.2 Messbarkeit menschlicher Einflussfaktoren

Bei Ereignissen, bei welchen mehrere menschliche Einflussfaktoren ursächlich einwirken, bleiben heute viele Fragen unbeantwortet bzw. werden ausgeblendet. Dazu gehören viele Vorfälle, bei welchen die irrtümliche Vorbei- oder Abfahrt bei Halt zeigenden Signalen eine Rolle spielen - in den vorangehenden Abschnitten wurden bereits diesbezügliche Beispiele behandelt. Bei vielen Untersuchungsberichten über Ereignisse, bei welchen die Kommunikation ursächlich beigetragen hat, fehlen konkrete Informationen wie Gesprächsprotokolle, obwohl sehr viele Funk- und Telefongespräche heute aufgezeichnet werden. Aus diesem Grund kann die Thematik der Kommunikation als Ursache von Fehlern jeweils nur oberflächlich untersucht werden. (SCHWAGER 2013: 41) Ausgehend von solchen Feststellungen wurde die Anwendung des Modells der Situation Awareness durch Nicole STOLLER im Rahmen einer Forschungsarbeit der Hochschule für Angewandte Psychologie untersucht, deren Grundlagen und Ergebnisse in den Abschnitten 2.1 und 5.1.7 dieser Arbeit vorgestellt werden.

3.2.3 Aufgaben der Schweizerischen Unfalluntersuchungsstelle SUST

Die Unfalluntersuchung stützt sich auf die schweizerische Eisenbahngesetzgebung, nach welcher die Eisenbahnunternehmen für die Sicherheit von Bau, Betrieb und Unterhalt der Infrastruktur und der Fahrzeuge verantwortlich sind. (SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT 1983: 10) Demnach richtet die unabhängige Untersuchungsstelle in ihren Berichten allfällige Sicherheitsempfehlungen an die Unternehmen. Die Aufsichtsbehörde kann zu den Empfehlungen Stellung nehmen. In besonderen Fällen wird bereits der Berichtsentwurf der Aufsichtsbehörde unterbreitet. (SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT 2000: 8) Die Untersuchungsberichte sind systematisch aufgebaut, wobei für vertiefte Abklärungen, wie zum Beispiel Materialprüfungen, Spurensicherungen, Ursachenanalysen usw. auch externe Stellen beigezogen werden können. Der Aufbau der Untersuchungen gliedert sich in der Regel in festgestellte Tatsachen (Fakten), Analyse und Beurteilung, Schlussfolgerungen sowie allfällige Sicherheitsempfehlungen. Beim Studium von ausgewählten Untersuchungsberichten fällt auf, dass die technischen und betrieblichen Aspekte wie Zustand und Funktion technischer Komponenten, Einhalten von reglementierten Prozessen, vorschriftsgemässe Manipulationen usw. gegenüber den menschlichen Faktoren überwiegen. Bei der Feststellung von menschlichem Versagen werden oft die Begleitumstände, weniger jedoch übergeordneten Zusammenhänge und Wechselwirkungen vertieft.

Am Beispiel des Zusammenstosses eines Dienstzuges auf eine stehende Wagengruppe in Dürrenast bei Thun am 17. Mai 2006 wird der Unfall in einer Kurzdarstellung wie folgt beschrieben: „Am Mittwoch, 17. Mai 2006 um ca. 03.20 Uhr ereignete sich kurz vor dem Bahnhof Thun ein Zusammenstoss zwischen einem fahrenden Dienstzug, dessen Bremsen nicht ordnungsgemäss funktionierten, und einer stehenden Wagengruppe auf der Strecke. Um den „bremslosen“ Dienstzug zu stoppen, entschlossen sich die Fahrdienstleiter (Fdl) im Zentralstellwerk (ZSW) von Spiez, diesen auf das gesperrte Gleis Gwatt - Thun (Gleis 301-303, seeseitig) zu leiten, wo sich zwei Baugruppen (Arbeitsstelle Rückbau aufgehobene Haltestelle Dürrenast, km 1.400 und Arbeitsstelle Lärmschutzwände, km 0.900) befanden. Die Mitarbeiter dieser Arbeitsstellen konnten rechtzeitig gewarnt werden, so dass sie sich in Sicherheit bringen konnten. Der Aufprall war so heftig, dass

die drei sich auf dem Unfallzug befindenden Personen (2 Lokführer und ein Mitarbeiter einer Privatfirma) tödlich verletzt wurden; alle Bauarbeiter der Arbeitsstellen Thun blieben unverletzt.“ Ergänzend zur Kurzfassung sei hier noch festgehalten, dass die ungebremste Anhängelast 295.5t, die Tara des Triebfahrzeugs 38t und das maximale Gefälle auf der Strecke zwischen Frutigen und Spiez 24‰ (WÄGLI 2010: 48) und zwischen Spiez und Thun 17‰ beträgt. (UNFALLUNTERSUCHUNGSSTELLE BAHNEN UND SCHIFFE UUS: 2007: 3ff) Gemäss Bericht wurden die technischen und betrieblichen Umstände tiefgehend analysiert. Die unter Beurteilung genannten Punkte hingegen enthalten demnach Erkenntnisse über technische und betriebliche Feststellungen wie folgende Beispiele aus dem Bericht zeigen:

- „Die Absperrhähne der Hauptluftleitung des Tm 235 099-9 waren wagenseitig geschlossen. Sie wiesen keine Schlagspuren auf, so dass mit grosser Sicherheit angenommen werden kann, dass diese bereits bei Abfahrt in Frutigen geschlossen waren.
- Sofort nachdem die Wagen der Fa. Sersa und Vanoli aufgegleist waren und ein Triebfahrzeug der BLS zur Verfügung stand, wurden auf Anordnung und unter Kontrolle des Untersuchungsleiters Bremsproben an diesen Wagen durchgeführt. Die Bremsen funktionierten einwandfrei.
- Die technischen Ausrüstungen der Tm 235 099 – 100 lassen eine korrekte Durchführung der Wirkungsbremsprobe nicht zu.
- Der Geschwindigkeitsmesser TEL 500 mit den zuletzt registrierten 3900 m entspricht dem erweiterten Einsatzgebiet der Schienenfahrzeuge bei den Baudiensten nicht mehr. Kontrollen betr. des Fahrverhaltens des Personals und die Ereignisabklärung werden über diese Distanz stark eingeschränkt.
- Die Fdl im ZSW Spiez haben in der Folge aufgrund ihrer Kenntnisse und den Vorschriften (Fahrdienstvorschriften und ECL 9 der BLS „Entlaufen von Schienenfahrzeugen“) zweckmässig gehandelt. Sie haben in der kurzen und hektischen Zeit die bestmögliche Lösung gesucht. Dabei war zu berücksichtigen,
 - dass ein Leiten in die Kiesenanlage Hondrich nicht in Frage kam; der Lf hatte eine möglichst „gerade“ Fahrstrasse verlangt.
 - dass eine solche Richtung Simmental nicht möglich war, weil, nebst der Ablenkung über eine Weiche mit V/max. 40 km/h, diese Linie ebenfalls durch Bauarbeiten unterbrochen war und
 - dass der Bahnhof Thun mit Zügen belegt war resp. nur Fahrten über Fahrstrassen mit V/ max. 40 km/h möglich gewesen wären (siehe Beilage 1).
- Als die Lf feststellten, dass die Komposition nicht genug bremste und die Bremsleistung für dieses Gefälle nicht mehr genügte, wurden alle im Triebfahrzeug vorhandenen Bremsmittel eingesetzt. Bei der zu diesem Zeitpunkt vorherrschenden Geschwindigkeit genügte dies jedoch nicht mehr.“

Mit hoher Sicherheit wurde festgestellt, dass die Hähnen der Hauptleitung zwischen dem Triebfahrzeug und dem ersten Wagen geschlossen waren und vor Abfahrt keine korrekte Bremsprobe durchgeführt wurde. „Mit nicht durchgehender Hauptleitung und somit ungebremster Anhängelast konnte das ungenügende Bremsvermögen des Versuchszuges deutlich nachvollzogen und gezeigt werden.“ (UNFALLUNTERSUCHUNGSSTELLE BAHNEN UND SCHIFFE UUS: 2007: 16ff) Zusätzlich wurden Unstimmigkeiten bei der Ausrüstung des Triebfahrzeugs festgestellt (Bedienungselemente und Geschwindigkeitsmesser), welche sich jedoch erst auswirkten, als der Zug mit der ungebremsten Anhängelast schon unterwegs war.

Eine Auswahl der Befunde wird wie folgt zitiert:

- „Der Absperrhahn der Hauptluftleitung zwischen Tm 235 099-9 und erstem Wagen war geschlossen.
- Es muss angenommen werden, dass die Bremsprobe nur durch eine Person durchgeführt wurde. Dabei haben sich offenbar Probleme ergeben, die auf unsachgemässe ja, unprofessionelle Art durch manuelle Bremsauslösung („melken“) der Wagen behoben wurde.
- Ein am Unfall beteiligter Lf hat die Ruhezeit von 10 Stunden nicht eingehalten.
- Ursache: Aufgrund der Untersuchungen muss davon ausgegangen werden, dass die Bremsprobe in Frutigen nicht korrekt durchgeführt wurde.

Diese Befunde führen zu folgenden Sicherheitsempfehlungen:

- Triebfahrzeuge mit einer automatisierten Steuerung, welche im Streckendienst eingesetzt werden, sind so auszurüsten, dass bei der Wirkungsbremsprobe die Bremsen des Triebfahrzeuges ausgelöst werden können.
- Triebfahrzeuge welche im Streckendienst eingesetzt werden, sind mit einer Geschwindigkeits-Messeinrichtung, gem. EBV Art. 54, auszurüsten, die eine durchgehende Registrierung der Fahrgeschwindigkeit gewährleisten.
- Die Abweichungen der Bremskräfte vom Soll-Wert sind abzuklären und auf den Soll-Wert zu korrigieren. Je nach Ergebnis sind die Abklärungen auf Fahrzeuge mit ähnlichem Bremskonzept auszudehnen.“

Das betroffene Eisenbahnunternehmen hat in Konsequenz des Unfalls vor allem Massnahmen im Bereich der Umsetzung des Arbeitszeitgesetzes getroffen, gestützt auf den Befund, dass einer der beteiligten Lokführer die gesetzmässige Ruhezeit nicht eingehalten hat. Die für die Ereignisbewältigung geprüften Varianten der Zugverkehrsleiter werden in der Beilage des Berichts zwar beschrieben, nicht jedoch analysiert und bewertet. Über die Wirkungszusammenhänge der menschlichen Faktoren sind im Zusammenhang mit diesem Ereignis weder Aussagen, noch Erkenntnisse oder Konsequenzen zu finden. Demnach wird unterstellt, dass sowohl auf Seite der beteiligten Mitarbeiter als auch seitens der verantwortlichen Unternehmen kein Verbesserungspotential besteht. Insbesondere beim Faktor Mensch bleiben im Zusammenhang mit diesem Ereignis jedoch einige Fragen aus den Bereichen Eventualplanung hinsichtlich Notfälle, Situationsbewusstsein und Systemkenntnisse offen. Aus Sicht einer lernenden Organisation dürften zudem Ergebnisse aus Analysen über die Wirkungszusammenhänge „Wahrnehmung - Entschluss - Handlung“ aller am Unfall beteiligten Personen von grossem Nutzen sein: Wie und in welcher Zeit erfolgte die Situationsanalyse der Zugverkehrsleiter? Wie sind die Zugverkehrsleiter auf Notfallsituationen vorbereitet? Wie wurden die Entscheidungsgrundlagen herbei geführt? Sind den Zugverkehrsleitern die Prozesse für die Ereignisbewältigung in Notfällen geläufig? Wurden die gemäss Unfalluntersuchungsbericht geprüften Varianten, den Zug zu stoppen, systematisch strukturiert oder intuitiv geprüft? Wie viel Zeit verstrich bis zur Überzeugung, dass der Zug nicht ohne Kollision angehalten werden kann? Solche Untersuchungen sind jedoch ausgesprochen delikat, im konkreten Fall umso mehr, da im Verlauf des Ereignisses drei Mitarbeiter ihr Leben lassen mussten. Es ist sehr schwierig, bei den betroffenen Mitarbeitern das Vertrauen zu gewinnen und die Überzeugung herzustellen, dass es bei den Untersuchungen nicht um Schuldzuweisungen, sondern um Erkenntnisse auf Systemebene und Lehren für die Zukunft geht. Im Rahmen dieser Arbeit wurden zahlreiche Unfalluntersuchungsberichte studiert mit der Feststellung, dass für die Herleitung von Schlussfolgerungen (Erkenntnisse) und Sicherheitsempfehlungen (Konsequenzen) kaum Wirkungszusammenhänge von menschlichen Faktoren analysiert werden.

3.2.4 Analyse von Unfalluntersuchungsberichten

Für das Entwickeln von Aussagen über Ereignisse, an deren Hergang sowohl Lokführer als auch Zugverkehrsleiter beteiligt waren, wurden insgesamt 52 Unfallberichte aus den Jahren 2003 bis 2013 analysiert. Die Auswahl der Ereignisse erfolgte nach ihrer Relevanz bezüglich nicht quantitativ messbarer Ursachenkategorien: Es wurden Ereignisse berücksichtigt, welche auf mindestens zwei der Aspekte „Kommunikation“, „Wahrnehmung“, „Entscheidung“ und „Handlung“ zurück zu führen sind. Die Ergebnisse der Analyse dienen der Genese von Problemstellungen, welche nicht auf linearem sondern nur unter Anwendung von Simulatoren untersucht werden können. Ferner gelten die Aussagen im Sinne einer empirischer Datenerhebung für die Veranschaulichung hypothetischer Problemstellungen zu einzelnen Sachverhalten, wie zum Beispiel der Verwechslung von Signalen in einer Staffel durch den Lokführer oder der Bedeutung der Kommunikation zwischen Zugverkehrsleiter und Lokführer. Die Unfallberichte wurden thematisch strukturiert und ausgewertet.

Die Schweizerische Unfalluntersuchungsstelle SUST entscheidet bei jedem meldepflichtigen Ereignis, ob eine Unfalluntersuchung einzuleiten ist. (SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT, 2000: 6). Die Berichte über die Unfalluntersuchung wurden für diese Arbeit nach den Kriterien Kommunikation und Komplexität menschlicher Handlungen ausgewählt. Die Analyse der Kausalitäten im Prozess Wahrnehmung, Entscheidung, Handlung lehnt sich an das Modell der Situation Awareness von ENDSLEY (1995: 35) an, welches die drei Ebenen Wahrnehmung, Verständnis und Vorhersage definiert. Dieses Modell gilt als Grundlage für die Untersuchungen von Mensch-Technik-Interaktionen und wurde auch von STOLLER (2013: 4) für die Fallstudien mit Lokführern auf den Simulatoren angewendet.

Aus der Analyse der 52 Unfallberichten nach Tabelle 5 gehen folgende Erkenntnisse hervor, dass in 44 von 52 Unfällen (84,6%) die Hauptursache einem Fehler in der Wahrnehmung zugeschrieben werden kann. Dies stützt die Theorie von Endsley, nach welcher mehr als 3/4 aller SA-Fehler auf der ersten Ebene der Wahrnehmung eintreten. (STOLLER 2013: 6) Bei dieser Auswertung von Ereignissen ist zu berücksichtigen, dass mit den Erkenntnissen ein sehr wenig differenziertes Bild über die Human Factor bei Mensch-Maschinen-Interaktionen entstehen kann: Das Ereignis wird erst feststellbar, wenn - im Sinne des bekannten „Swiss Cheese Model SCM“ von REASON (2008: 188f) - bereits eine oder mehrere Sicherheitsbarrieren versagt hat. Gemäss Tabelle 6 sind die Unfälle bezüglich vier wichtiger technischer Sicherheitsbarrieren untersucht worden. Auf Grund der hohen Verfügbarkeit technischer Sicherungsanlagen kann angenommen werden, dass das Ausbleiben der Wirkung dieser Barrieren auf das Fehlen derselben zurück zu führen ist. So zum Beispiel hätte in 19 von 52 Unfällen (36,5%) eine linienförmige Zugbeeinflussung (ZUB) zur Wirkung kommen sollen.

Eine ausschliesslich auf Unfallforschung basierende Sicherheitsstrategie birgt die Gefahr, dass im System vorhandene latente Gefährdungen über längere Zeit unerkannt bleiben, bis sie sich durch einen entsprechenden Unfall offenbaren. (PACHL 2011: 10)

Datum	Ort	Kurzdarstellung	Ursachen				Auswirkungen				wirkungslose Barrieren			
			Kommunikation	Wahrnehmung	Entscheidung	Handlung	SPAD	Zusammenstoss	Entgleisung	Brand	Durchbruch	Schutzweiche	Entgleisungsschuh	ZUB
15.07.03	Horchental	Überfahren Halt zeigendes Hauptsignal mangels Bremsung	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1
30.07.03	Biel	Rangierleiter gibt Fahrbefehl ohne Rangierfahrstrasse	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0
09.09.03	Burgdorf	Abfahrt zweier Züge bei Gruppensignal	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
09.12.03	Schwarzenbach	Abfahrt bei Halt zeigendem Ausfahrtsignal	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1
20.01.04	Lamone	Ungenügende Bremswirkung durch geschlossenen Bremshahn	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10.06.04	Oberwinterthur	Überfahren Halt zeigendes Zwergsignal durch Rangierfahrt	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0
20.04.05	Hüntwangen-Will	Falsche Massangabe des Rangierleiters mangels Beobachtung	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0
09.05.05	Tecknau	Fahrstrasse für Regionalzug in gesperrtes Gleis	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
18.01.06	Solothurn	Rangierleiter hält vor Halt zeigendem Zwergsignal nicht an	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0
28.02.06	Solothurn	Rangierleiter hält vor Halt zeigendem Zwergsignal nicht an	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0
28.04.06	Thun	Überfahren Halt zeigendes Zwergsignal durch Rangierfahrt	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0
17.05.06	Dürrenast (Thun)	Aufprall Bauzug auf Wagengruppe mangels Bremswirkung	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0
20.07.06	Olten	Kollision zweier Züge durch Abfahrt bei Halt zeigendem Ausfahrtsignal	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1
16.08.06	Rheinfelden	Kollision Zug mit Bauzug mangels Sicherung am Stellwerk	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
04.09.06	Grenchenberg	Unzeitige Aufhebung der Streckensperre (Bauzug auf der Strecke)	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
07.09.06	Monthey	Überfahren Halt zeigendes Hauptsignal durch falsche Bremsung	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
21.12.06	Hünenberg	Überfahren Halt zeigendes Hauptsignal durch Täuschung	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
11.02.07	Zürich Vorbahnhof	Überfahren Halt zeigendes Zwergsignal durch Rangierfahrt	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0
19.03.07	Sins	Abfahrt bei Halt zeigendem Ausfahrtsignal	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1
12.05.07	Forch	Falsche Notbedienung am Stellwerk: Zug gegen Zug auf Strecke	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
04.08.07	Biel RB	Kollision zweier Züge durch Überfahren Halt zeigendes Hauptsignal	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1
30.11.07	Winterthur	Kollision zweier Züge durch Verwechslung von Signalen	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1
02.09.08	Pardorea	Überfahren zweier Halt zeigendes Hauptsignale durch falsche Bremsung	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
04.10.08	Apples	Kollision Rangierfahrt gegen abgestellten Zug	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
28.05.09	Elgg	Überfahren Halt zeigendes Hauptsignal durch Verwechslung	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
04.06.09	Wimmis	Personenunfall durch Abfahrt mit offenen Türen	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30.06.09	Basel RB	Überfahren Halt zeigendes Rangiersignal durch Rangierfahrt	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
21.07.09	Noiraique	Abfahrt bei Halt zeigendem Ausfahrtsignal	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
19.08.09	Les Echenards	Kollision Zug mit Bauzug mangels Sicherung am Stellwerk	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
01.09.09	Möhlin	Überfahren Halt zeigendes Hauptsignal mangels Bremsung	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1
04.09.09	Lenzburg	Unzeitige Aufhebung der Streckensperre (Bauzug auf der Strecke)	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
07.10.09	Brandegg	Kollision Zug mit Bauzug mangels Sicherung am Stellwerk	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
18.11.09	Wildeggen	Überfahren Halt zeigendes Hauptsignal mangels Bremsung	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1
28.01.10	Brig	Kollision zweier Züge durch Überfahren Halt zeigendes Hauptsignal	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1
24.06.10	Felsenburg	Kollision zweier Züge durch Überfahren Halt zeigendes Hauptsignal	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1
30.06.10	Montreux	Verwechslung von Signalen infolge falscher Sicherung am Stellwerk	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
06.08.10	Zürich HB	Kollision Zug mit Bauzug mangels Sicherung am Stellwerk	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
27.08.10	Plambuit	Kollision zweier Züge durch Abfahrt bei Halt zeigendem Ausfahrtsignal	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1
15.09.10	Magadino	Ungenügende Bremswirkung durch geschlossenen Bremshahn	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15.09.10	St-Maurice	Rangierleiter gibt Fahrbefehl ohne Rangierfahrstrasse	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0
27.10.10	Othmarsingen	Sicherheitswärter warnt Mitarbeiter bei herannahendem Zug nicht	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16.12.10	Lutry	Falsche Gleissperrung durch unvollständige und falsche Kommunikation	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
04.02.11	Wengen	Kollision Zug mit Bauzug mangels Sicherung am Stellwerk	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
08.04.11	Rosé	Falsche Gleissperrung durch unvollständige und falsche Kommunikation	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
28.04.11	Klostern	Kollision Zug mit Bauzug mangels Sicherung am Stellwerk	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
08.08.11	Döttingen	Kollision zweier Züge durch Abfahrt bei Halt zeigendem Ausfahrtsignal	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1
15.10.11	Altdorf	Abfahrt bei Halt zeigendem Ausfahrtsignal	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1
22.11.11	Rueun	Kollision Zug mit Rangierbewegung durch falsche Rangierleitung	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1
24.11.11	Thun	Abfahrt zweier Züge bei Gruppensignal	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
17.04.12	Biel-Madretsch	Falsche Gleissperrung durch unvollständige und falsche Kommunikation	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
08.05.12	Schmittlen	Unzeitige Aufhebung der Streckensperre (Bauzug auf der Strecke)	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19.09.12	Vufflens-la-Ville	Zugfahrstrasse in gesperrtes Streckengleis durch Fehlfunktion Stellwerk	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

SUTER 2014

Tabelle 5: Übersicht über die ausgewählten Ereignisse mit komplexem Hintergrund. Die Bewertung erfolgt zu den drei Kriterien Ursachen, Auswirkungen und wirkungslose Barrieren. Relevante Argumente erhalten den Wert 1 und sind rot markiert. Dabei wird sichtbar, dass bei den meisten Ereignissen die Kommunikation und die Wahrnehmung ursächlich beigetragen haben. (Quelle: SCHWEIZERISCHE UNFALLUNTERSUCHUNGSSTELLE SUST)

3.3 Grenzen und Risiken der Automatisierung (vgl. Kapitel 1: **B**)

In der Einleitung sind verschiedene Beobachtungen zur Entwicklung der Eisenbahnsicherungstechnik und der Schienenfahrzeuge festgehalten. Unter Ziffer 1.3.1 ist erwähnt, dass dabei die Automatisierung in zwei Arten unterteilt werden kann: Während die Bediensteten in den Stellwerken fast vollständig automatisiert wurden, sind die Lokführer noch immer im Einsatz, obwohl gemäss dem Stand der Technik auch sie ersetzt werden könnten. Es wurde festgestellt, dass sich beide Berufsbilder vom Bediener zum Überwacher gewandelt haben, indem viele manuelle Tätigkeiten von der Technik übernommen wurden. Dies entspricht einem Übergang von aktiven Systemen (der Mensch hat eine aktive Rolle bei der Bedienung des technischen Systems) hin zu monitiven Systemen (der Mensch überwacht die Ausführung der Funktionen). (HAMMERL, 2011: 80)

3.3.1 Situationsanalyse bei komplexen Problemen

Nebst den Ursachen und Gründen für diese unterschiedliche Entwicklung interessierten in diesem Zusammenhang vor allem Fragen über die Wahrnehmung der Verantwortung des betreffenden Personals. Welches sind die Folgen und Auswirkungen, wenn Zugverkehrsleiter durch ihre zentralisierte Tätigkeit Orts- und Systemkenntnisse aus der Fläche sowie Antizipation durch Erfahrung verloren haben? Sind die Zugverkehrsleiter auch in Extremsituationen in der Lage, die notwendigen Entscheidungen richtig und zeitgerecht zu treffen? Nach NINCK/BÜRKI/HUNGERBÜHLER/MÜHLEMANN (2004: 65) ist bei komplexen Problemen die Situationsanalyse von zentraler Bedeutung. Sie enthält folgende drei grundsätzliche Tätigkeiten:

- Informationsbeschaffung,
- Informationsaufbereitung,
- Informationsdarstellung.

Man kann sich sicher leicht vorstellen, dass die früheren Stellwerkbediensteten durch ihre Orts- und Systemkenntnisse, ihre Nähe zum Geschehen und ihre Berufserfahrung aus der Praxis den oben beschriebenen Tätigkeiten für ihren Bereich schneller Herr wurden als ein Zugverkehrsleiter in der Betriebszentrale, welcher einen bestimmten Fernsteuerbezirk mit einer Anzahl von Stellwerken zu überwachen hat. Moderne Sicherungsanlagen stellen wegen ihres hohen Automatisierungsgrades besonders hohe Anforderungen an die Zugverkehrsleiter, wenn bei Störungen der Betrieb in der Rückfallebene in Personalverantwortung zu führen ist. (PACHL 2011: 8)

3.3.2 Vergleich mit militärischer Entschlussfassung

Im Ereignisfall kann die Entscheidungsfindung auch an militärischer Methodik reflektiert werden, da die Ausgangslage bezüglich Zeitkritikalität vergleichbar ist. Das Reglement über die Taktische Führung der Schweizer Armee beschreibt den Prozess der Beurteilung der Lage, welcher der Entschlussfassung zu Grunde liegt. Dabei geht man „analytisch von einer Sammlung von Aussagen (Fakten) aus, verdichtet diese zu Erkenntnissen und leitet daraus handlungsorientierte Konsequenzen ab. [...] Der für den Entschluss bestimmende Faktor muss in Form von messbaren, quantifizierbaren oder beschreibbaren Fakten definiert werden. Durch die verschiedenen Aussagen sollen hervorgehoben werden

- die Voraussetzungen,
- die Auflagen,
- der Handlungsspielraum.

Erkenntnisse liefern die ersten Hinweise auf

- Ort und Zeitpunkt des Einsatzes der Mittel,
- die zu schaffenden Voraussetzungen,
- die nächsten Planungsschritte.

Konsequenzen sind Leitlinien, die zur Ausarbeitung der verschiedenen Varianten dienen. SCHWEIZER ARMEE (2004: 62)

Auf dieser Grundlage kann die Entschlussfassung von Problemen mit hohen potentiellen Risiken herbei geführt werden. Im Zuge der Automatisierung und Zentralisierung muss Fachkompetenz, Orts- und Systemkenntnisse des Personals dahingehend erhalten werden, dass im Ereignisfall eine folgerichtige und zeitgerechte Entscheidungsfindung möglich ist. Darauf wird heute typischer-

weise mit Instrumenten wie Checklisten eingewirkt, welche nach Vorgabe ein systematisches Vorgehen sicher stellen sollen. Dabei ist jedoch auch zu bedenken, dass sich der Verlauf eines Ereignisses innerhalb der Komplexität des Eisenbahnbetriebs nur teilweise standardisieren oder vorausbestimmen lässt.

3.3.3 Frage der Risikoakzeptanzgrenzen

In diesem Kontext führt die Frage nach den Grenzen der Automatisierung nicht an der Frage nach den Risikoakzeptanzgrenzen vorbei. Es geht darum festzustellen, wie das Personal vor dem Hintergrund der Automatisierung seine Verantwortung wahrnehmen kann. Dabei müssen unter anderem folgende Faktoren in die Überlegungen mit einbezogen werden:

- Extremanforderungen im Ereignisfall,
- Verlust von Systemkenntnissen,
- Wegfall persönlicher Kommunikation zwischen Lokführer und Zugverkehrsleiter,
- zunehmende Monotonie am Arbeitsplatz,
- mangelnde Identifizierung und Zufriedenheit des Personals,
- grosse Heterogenität an alten und neuen technischen System im Eisenbahnnetz.

Untersuchungen der Universität Würzburg über die Auswirkung von Teilautomatisierung auf das Fahrverhalten haben ergeben, dass beim Übergang von Überwachungstätigkeiten zu situationsbedingten Handlungen (z.B. unvorhergesehenes Bremsen), Reize, die für die Überwachung nicht relevant sind, nicht mehr in der angemessenen Art und Weise verarbeitet und umgesetzt werden. Ersetzende Assistenzsysteme und Automatisierung können das menschliche Aufmerksamkeitssystem, das auf Ressourcenoptimierung und Aufwandsminimierung ausgerichtet ist, in Schwierigkeiten bringen. Es besteht zudem die Gefahr, dass sich die Überwacher neben ihrer Arbeit mit anderen Dingen beschäftigen. (BULD/KRÜGER 2003: 6)

Um die Risiken zu analysieren, müssen die möglichen Probleme ermittelt, die Wahrscheinlichkeit W des Eintretens bestimmt, die Tragweite T eingeschätzt, aus $R \times T$ der Risikowert berechnet, aus der Summe aller Risikowerte das Gesamtrisiko bestimmt und die Ergebnisse interpretiert werden. NINCK/BÜRKI/HUNGERBÜHLER/MÜHLEMANN (2004: 145) Die Wirkungen oben genannter Einflussfaktoren sind jedoch noch kaum bekannt und müssten daher untersucht werden.

3.4 Komplexität durch Kommunikation (vgl. Kapitel 1:

Der Bereich der Kommunikation stellt in der Betriebsführung der Eisenbahn einen grundsätzlichen Faktor dar. Oberstes Ziel bei der Übermittlung von Informationen ist es, Fehlinterpretationen und Missverständnisse zu vermeiden, welche zu falschen Entschlüssen und Handlungen führen könnten. In Abschnitt 3.5 wurde festgestellt, dass Befehle, Handlungsanweisungen und Hinweise an den Lokführer typischerweise mit Signalen übermittelt werden. Beim Studium der Signalvorschriften fällt - vor allem dem Aussenstehenden - die grosse Vielfalt an Signalen auf. Im Vergleich zum Strassenverkehr, bei welchem die Signalisierung im Jahre 1968 durch das Wiener Übereinkommen europaweit normiert wurde, kommen bei der Eisenbahn zahlreiche Signalsysteme vor, welche sich zum Teil überlagern (mehrere verschiedene Signale können die gleiche Bedeutung haben). Dies erhöht unter anderem auch die Anforderungen im Sinne des Vermeidens von Missverständnissen.

3.4.1 Kommunikation zwischen Lokführer und Zugverkehrsleiter

Für die Regelung und Sicherung des Zugverkehrs sind jedoch auch direkte Gespräche zwischen Zugverkehrsleiter, Lokführer, Bediensteten für Bau und Instandhaltung von Infrastruktureinrichtungen und Fahrzeugen, Reisenden im Personenverkehr sowie Personal für den Umschlag von Gütern notwendig. Die Kommunikationsmittel haben sich im Zuge der technischen Entwicklung bei der Eisenbahn stark verändert. Dienten ursprünglich Telefon (Telephon) und Telegraf (Telegraph) der Übermittlung von Informationen, werden heute Satellitentelefone, SMS und E-Mail verwendet. Codierte Meldungen nach vorgegebenem Schema (zum Beispiel Morsezeichen, Codiertabelle, Buchstabiertabelle usw.) werden heute nicht mehr verwendet. Auch die in den Fahrdienstvorschriften festgehaltenen Sprechregeln für die Funkübermittlung sowie die vorgegebene Funkdisziplin verlieren heute an Bedeutung. Die sogenannte fernmündliche Kommunikation hat sich mit den Gewohnheiten aus dem Privatleben stark vermischt. Dieser Umstand birgt auch Gefahren: Die unbewusste Selbstverständlichkeit, sich jederzeit mit den zuständigen Personen in Verbindung setzen zu können, vermindert die Notwendigkeit der Vorausplanung. Mirjam SCHWAGER (2013) hat sich in ihrer Bachelorarbeit an der Hochschule für Angewandte Psychologie und in Zusammenarbeit mit dem vorliegenden Forschungsprojekt der Untersuchung der Kommunikation zwischen Zugverkehrsleiter und Lokführer angenommen. Als Grundlage für diese Untersuchungen wurden auch zahlreiche Ereignisse und Unfälle herbei gezogen, deren Ursache mit der Kommunikation im Zusammenhang steht. Die Bachelorarbeit ist im Kapitel 1 näher vorgestellt.

3.4.2 Problem der Mehrsprachigkeit in der Schweiz

Eine zusätzliche Herausforderung bei der Kommunikation im Eisenbahnbetrieb bildet die Mehrsprachigkeit der Schweiz in Verbindung mit dem hohen Anteil an Transitverkehr und dem Netzzugang für Eisenbahnverkehrsunternehmen aus dem In- und Ausland. Die Infrastrukturbetreiber regeln die Sprachgrenzen in ihren Betriebsvorschriften. Es liegt in der Verantwortung der Eisenbahnunternehmungen, für die erforderlichen Sprachkenntnisse ihres Personals zu sorgen. Dass dies nicht immer reibungslos funktioniert, zeigt folgendes Beispiel in der Kurzdarstellung des Untersuchungsberichts: *„Am Dienstag, 02. September 2008 um 15:30 h und um 15:56 h ist der Güterzug 40027 (Rail 4 Chem, Kombierter Verkehr Rotterdam – Brescia) an zwei Halt zeigenden Signalen (100 P und 102 P) in Pardorea (Rodi-Fiesso / Gotthard Südrampe) vorbeigefahren. Gemäss Aussage des Lokführers haben die Bremsen des Zuges nicht richtig reagiert. Trotz einer Schnellbremsung überfuhr der Zug 40027 um 15:30 h das Hauptsignal 100 P. Nach Kontaktaufnahme des Lokführers mit dem Fahrdienstleiter in Bellinzona gab der Fahrdienstleiter die Zustimmung für die Weiterfahrt bis zum nächsten Blocksignal 102P. Bei Annäherung an das zweite Vorsignal begann der Lokführer wieder zu bremsen. Als er bemerkte, dass die Bremsen sehr wenig Wirkung hatten, leitete er wieder eine Schnellbremsung ein. Der Zug überfuhr das Hauptsignal 102P um einige Meter.“* (UNFALLUNTERSUCHUNGSSTELLE BAHNEN UND SCHIFFE UUS: 2009: 2) Laut Bericht hat der Lokführer von Zug 40027 in seiner Stellungnahme vom 4. September 2008 unter anderem folgende Aussagen gemacht: *„Da ich keine Funkverbindung hatte, beschloss ich ans Signaltelefon zu gehen. Inzwischen hatte ich den Lokführer eines Gegenreisezugs getroffen und ihn gefragt, ob er eine digitale Funkverbindung hätte. Der Lokführer des Reisezuges sagte nein, und so habe ich am Signaltelefon Kontakt mit dem Fahrdienstleiter in der Fahrdienstzentrale Bellinzona (CER) aufgenommen. Der Fahrdienstleiter gab mir die Fahrerlaubnis bis zum nächsten Signal. Nach der Wiedereingabe der Fahrdaten fuhr ich wieder los. Bei der Annäherung an das nächste Signal fing ich wieder an zu bremsen, aber die Bremsen reagierten erneut nicht, wie sie sollten, und ich leitete wieder eine Schnellbremsung ein. Die Lok kam genau auf der Höhe des Hauptsignals zum Stillstand. Danach erhielt ich einen Funkanruf vom Fahrdienstleiter. Dieser teilte mir mit, dass ich auch dieses Signal überfahren hätte.“* (UNFALLUNTERSUCHUNGSSTELLE BAHNEN UND SCHIFFE UUS: 2009: 4ff) Diese Aussagen zeigen, dass die Züge offenbar mindestens zeitweise keinen Funkkontakt mit der Betriebszentrale hatten. Die Kommunikation mit dem Lokführer

des Gegenzugs 2286 ist auf Anordnung des Zugverkehrsleiters (Befehl für ausserordentlichen Halt bei der Lok von Zug 40027) zu Stande gekommen, da die Betriebszentrale den Lokführer weder über Funk noch telefonisch (Handy) erreichen konnte. Zum Thema der Kommunikation zwischen Lokführer und Zugverkehrsleiter hält der Bericht lediglich fest: „Die Funkgespräche sind für dieses Ereignis nicht relevant. Die Funkgespräche zwischen dem Fahrdienstleiter und dem Lokführer wurden in deutscher Sprache geführt.“ (UNFALLUNTERSUCHUNGSSTELLE BAHNEN UND SCHIFFE UUS: 2009: 6) Im Verlauf der Untersuchung des Vorfalls wurden verständlicherweise auch die technischen und betrieblichen Aspekte vertieft. Die Ergebnisse stehen zum Teil im Widerspruch mit den Aussagen des Lokführers, technische Mängel wurden keine festgestellt. Es stellt sich jedoch die Frage, weshalb die Kommunikation zwischen Lokführer und der Betriebszentrale nicht näher untersucht wurde, obwohl es in diesem Bereich offensichtliche Mängel gegeben hat. Die Tatsache, dass die Gespräche in deutscher Sprache geführt wurden (die Betriebszentrale Bellinzona befindet sich auf italienischsprachigem Gebiet) weisen ferner auf die zu Beginn dieses Absatzes erwähnte Problematik der Mehrsprachigkeit hin. SCHWAGER (2013: 39f) hält dazu fest, dass durch mangelnde Anwendung der Sprache vieles in Vergessenheit gerät, was in Stresssituationen zu einer totalen Blockade führen und in der Folge gravierende Missverständnisse zur Folge haben kann. Deshalb ist es wichtig, dass sich Zugverkehrsleiter besonders im Bereich von Sprachgrenzen an Standardsätze halten, welche die Lokführer unter allen Umständen richtig einordnen können. Ferner wird eine intensiviertere sprachliche Aus- und Weiterbildung für das Personal sowie die Verfügbarkeit von Sprachspezialisten in den Betriebszentralen diskutiert.

Da sich ganz besonders auch die Thematik der Kommunikation auf analytischem Weg nur schwer untersuchen lässt, eignen sich simulationsbasierte Modelle, um Wirkungszusammenhänge festzustellen und daraus entsprechende Erkenntnisse abzuleiten.

3.5 Wahrnehmen - Entscheiden - Handeln (vgl. Kapitel 1: **D**)

Im Folgenden wird versucht, betriebliche Abläufe bei der Eisenbahn vor dem Hintergrund der Komplexität zu verstehen. Diese Abläufe können in die Wahrnehmung, welche die Grundlage für die Entscheidung, welche wiederum die Grundlage für die Handlung bildet, gegliedert werden. Wahrnehmung - Entscheidung - Handlung kann auch als System mit Wirkungszusammenhängen verstanden werden (vgl. Abbildung 24).

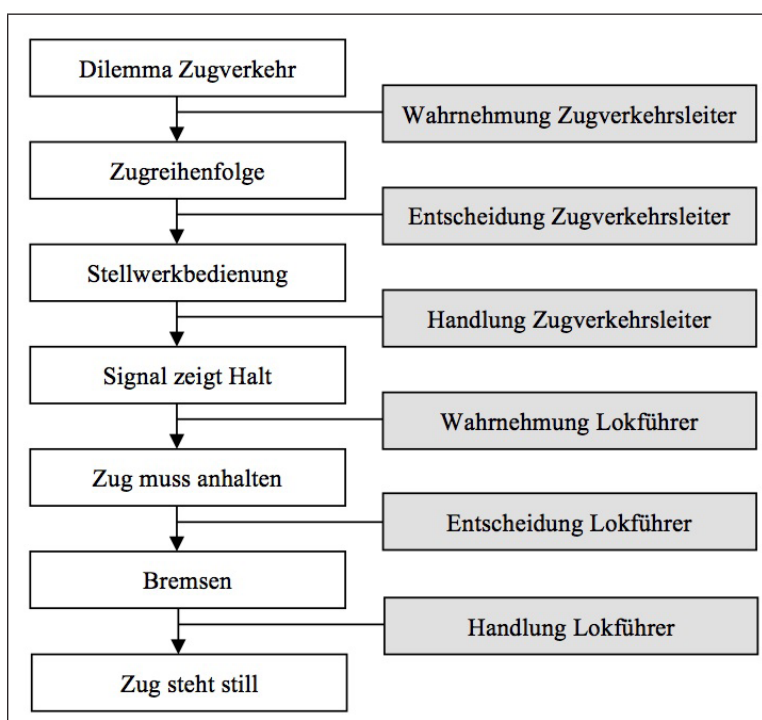


Abbildung 24: Das Wirkungsgefüge Wahrnehmung - Entscheidung - Handlung am Beispiel einer betrieblichen Situation. (Darstellung nach SUTER/STRAUBE/RIESEN 2012: 172)

Die Übermittlung von Befehlen und Anordnungen an den Lokführer erfolgt in der Regel über Signale, welche im Verantwortungsbereich vom Zugverkehrsleiter gesteuert werden. Für die Schadensverhinderung oder -begrenzung werden Zugbeeinflussungssysteme eingesetzt, welche bei menschlichen oder technischen Fehlern den Lokführer warnen und/oder am Zug eine Zwangsbremse bewirken. Als Ergänzung zu den Signalen stehen Funk-/Telefonverbindungen zur Verfügung, für welche in den Fahrdienstvorschriften klare Sprechregeln definiert sind, um Missverständnisse zu verhindern.

3.5.1 Beobachtungsaxiome als Grundlage für die Entwicklung von Signalen

Die Abbildung 25 zeigt die hippsche Wendescheibe, welche auf dem schweizerischen Eisenbahnnetz bis in die siebziger Jahre des letzten Jahrhunderts weit verbreitet waren. In den einzelnen Ländern Europas haben sich die Signale der Eisenbahn jedoch unterschiedlich entwickelt. Noch heute sind uns die Beobachtungsaxiome bekannt, die den Erkenntnissen entsprechen, welche Claude Chappe im Jahre 1792 Napoleon I. zur Verfügung stellte: (WÄGLI, schriftliche Mitteilung am 04.12.2012)

1. Die Sichtbarkeit eines Gegenstandes ist mit dem Quadrat seiner Entfernung umgekehrt proportional.
2. Die Sichtbarkeit eines beleuchteten Gegenstandes nimmt mit der Quadratwurzel aus seiner Fläche und aus der Intensität seiner Beleuchtung ab.
3. Eine Fläche länglicher Form sieht man weiter als eine gleich grosse Fläche quadratischer oder runder Form.
4. Alle Signalzeichen sollen sich gegen den Himmel projizieren.
5. Hervorragende Teile, selbst geringer Abmessungen, sind an schmalen geradlinigen Körpern solange zu erkennen wie diese selbst.
6. Ein gegen den Horizont projizierter Gegenstand von 1,75 m Länge und 0,40 m Breite ist bei mittlerem Zustand der Atmosphäre noch auf 7,6 km Entfernung mit blossen Auge sichtbar.
7. Alle Farben beleuchteter Flächen verschwinden bei gewisser Beleuchtung. Deshalb ist nur die Form und nicht die Farbe für die Telegraphie benutzbar.
8. Wenn die Sichtbarkeit einer weissen Flamme gleich 1 ist, so ist die einer roten Flamme gleicher Intensität $\frac{1}{3}$, die einer grünen $\frac{1}{5}$ und die einer blauen $\frac{1}{7}$.
9. Flammen gleicher Farbe rinnen in ein Bild zusammen, wenn ihr Abstand voneinander nicht mehr als $\frac{1}{1000}$ der Sehweite beträgt.
10. Flammen verschiedener Farben lassen sich, besonders bei Komplementärfarben, so lange unterscheiden, als die am schwächsten leuchtende Flamme noch sichtbar ist.
11. Weisses Licht allein taugt für Signale auf grosse Entfernung hin nie, da es bei gewissen atmosphärischen Zuständen rot, orange oder grün erscheinen kann.
12. Die Bewegung eines Lichts ist in der Nacht so lange unsichtbar, als nicht ein ruhendes Licht sich in der Nähe befindet.

Die Beobachtungsaxiome haben auch die Entwicklung der Eisenbahnsignale beeinflusst, wie im Werk von WEBER (1867: 9-10) nachzulesen ist: „[...] diese Linien waren auf Grund der Forschungen der Gebrüder Chappe über die Sichtlichkeit der Körper und Lichter und im Wesentlichen nach

ihren Prinzipien konstruiert. Die Hauptresultate dieser Forschungen, auch von hoher Wichtigkeit für die optische Telegraphie der Eisenbahnen und dennoch so wenig von den Technikern gekannt, so selten beachtet, woher so viele absurd konstruierte Eisenbahnsignalsysteme entstanden, [...]. Es ist natürlich, dass, auf Grund dieser Beobachtungsaxiome konstruierte Signalapparate, für den Dienst bei Tage die Form von Flügeltelegraphen annahmen, bei Nacht farbige Constellationen auf dunklem Grunde zeigten.“ Es ist erstaunlich, welche Aktualität dem oben genannten, fast 150-jährigen Zitat bis in die Gegenwart noch beizumessen ist, wie die zwei nachfolgenden Abschnitte aufzuzeigen versuchen.



Abbildung 25: Die hippsche Wendescheibe wurde als erstes Signal der Schweizer Eisenbahnen im Jahre 1862 durch Matthias Hipp entworfen. Es wurde so gestaltet, dass es sich unter allen Witterungsbedingungen und Lichtverhältnissen genügend von der Umgebung abgrenzt. (BARMETTLER, 01.09.2012)

3.5.2 Zwei verschiedene Typen von Lichtsignalen in der Schweiz

Nachdem die mechanischen Signale aus dem Eisenbahnbetrieb in der Schweiz fast ganz verschwunden sind (die letzten Semaphore im fahrplanmässigen Betrieb sind im Rangierbahnhof Biel/Bienne anzutreffen), werden heute für die Haupt- und Vorsignale zwei grundsätzliche Typen verwendet: Das Signalsystem L (Lichtpunkte) und das Signalsystem N (numerisch). Die Signalisierungskonzepte der Systeme sind grundsätzlich verschieden. Während beim System L die Geschwindigkeiten mit der Anordnung verschiedener grünen und gelben Lampen angezeigt werden, leuchtet beim System N eine entsprechende Zahl für den Faktor 10 in km/h auf. Das Signalsystem N wurde Ende der 1990er Jahre entwickelt und eingeführt und sollte ursprünglich das Signalsystem L ersetzen. Heute ist es weitgehend den Eisenbahnunternehmen (Infrastrukturbetreiber) überlassen, ob bei der Erneuerung von Sicherungsanlagen das Signalsystem L oder N eingebaut werden soll. Demnach wurden in den letzten Jahren Strecken und Bahnhöfe (z.B. Escholz matt - Luzern) nach dem Umbau der Sicherungsanlagen erneut mit dem Signalsystem L aus dem Jahre 1930 ausgerüstet. Dieser Umstand leistet einen zusätzlichen Beitrag zur grossen Komplexität im Signalwesen der Eisenbahnen.

3.5.3 Vereinheitlichung der Signalisierung durch ETCS

Das neue European Train Control System (ETCS) verfolgt das Ziel, die grosse Vielfalt an technischen Sicherungseinrichtungen in den europäischen Ländern zu reduzieren und die Zugbeeinflussung sowohl technisch als auch betrieblich und auf einer einheitlichen Basis zu vereinfachen. Die Anwendung von ETCS umfasst drei Ebenen, wobei die Signalübermittlung zwischen Infrastruktur und Fahrzeugen künftig über eine standardisierte Eurobalise erfolgen soll. Der Level 1 entspricht dem ersten Ausbauschritt mit den bestehenden Aussensignalen, welche zusammen mit Eurobalisen funktionieren. Bei Level 2 fahren die Züge nach wie vor im festen Raumabstand, jedoch wird die Aussensignalisierung durch eine Führerstandssignalisierung ersetzt, was in den meisten Fällen einen Neubau der Sicherungsanlagen bzw. Stellwerken erfordert. Der Level 3 ist bis heute noch nicht im Regelbetrieb eingeführt. Bei diesem ETCS-Level sollen die Züge im relativen Raumabstand verkehren, wobei sich die Streckenkapazität (etwas) vergrössern lässt. Hinsichtlich der Komplexität im grenzüberschreitenden Eisenbahnbetrieb ist jedoch vor allem die Idee ab ETCS-Level 2 zu erwähnen, in dem die in den einzelnen Ländern völlig verschiedenen Aussensignale durch ein Einheitsdisplay im Führerstand ersetzt werden. Leider gibt es in der Realität im Zuge des ETCS-Systemaufbaus viele neue länderspezifische Regelungen, welche der ursprünglichen Idee der Vereinheitlichung entgegen zu laufen scheinen. So zum Beispiel werden in der Schweiz neue Signale für den Rangierbetrieb sowie Hinweistafeln für den Betrieb mit ETCS-Level 2 entwickelt, welche den Umfang an bestehenden Signalen vergrössern, ohne dass eine Koordination mit den anderen Länder erkennbar wäre. Dies ist ein weiterer Umstand, der sich auf das Problem der Komplexität im Eisenbahnbetrieb ungünstig auszuwirken scheint.

3.5.4 Signalfälle als Sicherheitsindikator

Ein möglicher Indikator, die Konsequenzen der Komplexität im Eisenbahnbetrieb zu messen, sind die Signalfälle (Signal Passed At Danger SPAD). Dabei geht es um Begebenheiten, bei welchen der Lokführer an einem Halt zeigenden Signal vorbei fährt, ohne dass er dafür eine Zustimmung erhalten hat. Die SPAD-Zahlen werden heute zu verschiedenen Zwecken erfasst und ausgewertet. Es lohnt sich jedoch, genauer hinzusehen, wie diese Fälle zu Stande kommen und wo die Schwierigkeiten dabei liegen. Während das Erfassen und Auswerten der Signalfälle auf den ersten Blick eine einfache quantitative Methode zu sein scheint, offenbart sich bei genauerer Betrachtung eine Vielzahl von Unsicherheiten: Durch die Vielfalt an Signalen und deren Funktion im Kontext der jeweiligen Fahrdienst- und Betriebsvorschriften ist die für die Erfassung der SPAD relevante Abgrenzung des Signalbegriffs nicht ganz klar. Es ist beispielsweise umstritten ob und welche Signale des Rangierdienstes mitgezählt werden sollen. Ein anderer Unsicherheitsfaktor sind Signale, welche mit einer linienförmigen Zugbeeinflussung ausgerüstet sind. Diese Einrichtung berücksichtigt die Bremskurve des Zuges und leitet im Ereignisfall eine Zwangsbremse so ein, dass der betroffene Zug noch vor dem Signal zum Stillstand kommt. Die allfällige Reaktion des Lokführers - wenn diese Einrichtung nicht vorhanden gewesen wäre - kann nicht mehr rekonstruiert werden. In solchen Fällen ist ebenfalls unklar, ob und wie diese zu den Signalfällen gezählt werden können. Schliesslich gibt es eine Dunkelziffer in unbekannter Höhe, da sich Lokführer aus Angst vor Repressionen kaum selbst anzeigen, sofern der Signalfall nicht oder nicht offensichtlich registriert wurde.

Die Auswertung von Signalfällen am Beispiel von Fallstudien sowie auf Grund von Statistiken und Berichten ist im Teil der experimentellen Analysen (Abschnitt 6.3) behandelt.

3.5.5 Komplexe Problemstellungen am Beispiel der Signalfälle

In dieser Arbeit wurde bereits mehrmals festgestellt, dass die Forschung im Bereich Human Factors bei der Bahn im Gegensatz zum Flugverkehr noch nicht sehr weit fortgeschritten ist. Die Schweizerische Unfalluntersuchungsstelle (SUST) untersucht als staatliche Behörde der Schweizerischen Eidgenossenschaft Unfälle und gefährliche Ereignisse von Bahnen, Luftfahrzeugen und Schiffen. Dabei sollen nicht nur die unmittelbaren Ursachen solcher Ereignisse ermittelt, sondern auch deren tieferliegende Gründe und weitere mit ihnen verbundene Risiken gefunden werden. Damit wird ausschliesslich das Ziel verfolgt, Erkenntnisse für die Verhinderung künftiger Unfälle und Gefahrensituationen zu gewinnen und auf diese Weise die Sicherheit zu erhöhen. (<http://www.sust.admin.ch/de/>, 4.1.2014) Im Kapitel 3 über die theoretischen Analysen wurden einige Unfallberichte der SUST zitiert und analysiert (vgl. Tabelle 6). Daraus geht hervor, dass gerade im Bereich der Human Factors kaum vertiefte Untersuchungen angestellt wurden, da der Unfalluntersuchungsstelle besonders auch die Ressourcen dazu fehlen.

Ein Thema, welches durch seine Komplexität besondere Anforderungen an die Untersuchungen stellt, ist die Vorbeifahrt von Zügen an Halt zeigenden Signalen (vgl. Abschnitt 3.5). Solche Fälle, in der Schweiz „Signalfälle“ genannt, sind bis heute erst selten auf der Systemebene untersucht worden. Als hoheitliche Meldestelle erfasst und bewertet das Bundesamt für Verkehr BAV die Signalfälle und stützt sich dabei auf die Verordnung über die Meldung und die Untersuchung von Unfällen und schweren Vorfällen beim Betrieb öffentlicher Verkehrsmittel (VUU, SR 742.161). Auf dem schweizerischen Eisenbahnnetz wurden in den Jahren 2010 bis 2012 folgende Meldungen über Signalfälle verzeichnet:

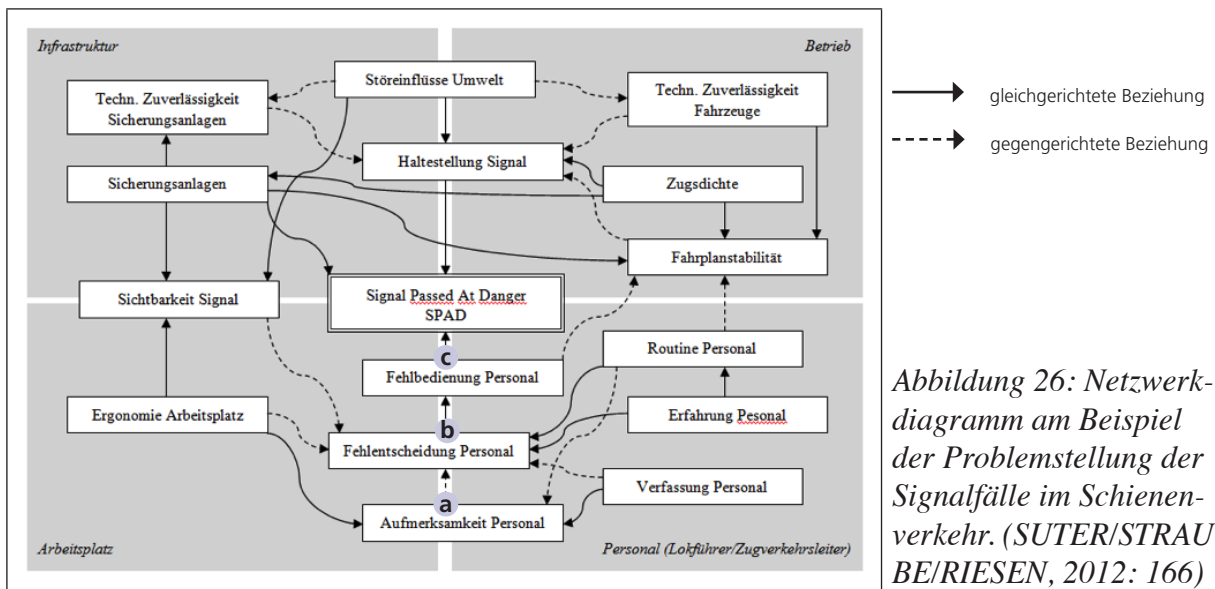
	2010	2011	2012
Anzahl der gemeldeten Signalfälle	118	124	136
Entwicklung der Signalfälle in % (Index 2010)	100%	105%	115%

Tabelle 6: Die Gesamtzahl der Signalfälle steigt an. Immerhin sind innerhalb von zwei Jahren 15% mehr Signalfälle zu verzeichnen. (BUNDESAMT FÜR VERKEHR, 2013b: 4)

Betrachtet man die Zahlen des Bundesamts für Statistik, Zeitreihen öffentlicher Verkehr 2010-2012, erhält man für den Schienenverkehr folgende Leistungen (in Tausend Zugs-Kilometer): 185'479 (2010), 187'049 (2011) und 189'666 (2012). (BUNDESAMT FÜR STATISTIK) Daraus geht hervor, dass sich die Zugskilometer gegenüber dem Jahr 2010 insgesamt um 0.8% (per Ende Jahr 2011) bzw. 2.3% (per Ende Jahr 2012) verändert haben. Dies wiederum lässt den Schluss zu, dass auf dem schweizerischen Schienennetz gemessen an der Verkehrsleistung in Zugskilometer eine überproportionale Entwicklung der Signalfälle festzustellen ist. Über die Ursache dieser Entwicklung gibt es kaum nachweisbare Angaben. Diesbezügliche Untersuchungen gestalten sich schwierig, da es sich um eine komplexe Situation handelt.

Das Diagramm in Abbildung 26 zeigt das Wirkungsgefüge bei einer systematischen Betrachtung der Ursachen von Signalfällen (engl. Signal Passed At Danger SPAD). Die Systemelemente sind in die vier Bereiche Infrastruktur, Betrieb, Arbeitsplatz und Personal unterteilt, wobei sie auch bereichsübergreifend angeordnet werden können. Auch in dieser Betrachtung ist erkennbar, dass die Beträge vieler Systemelemente nicht oder nur schwer mit quantitativen Methoden erfasst werden können. Faktoren wie „Aufmerksamkeit“, „Verfassung Personal“ oder „Fehlentscheide Personal“ können jedoch mit bestehenden Verfahren des *Human Reliability Assessment* oder *Human Reliability Analysis* (HRA) bewertet werden. (HAMMERL 2011: 51)

Sowohl in Abbildung 26 als auch in den sieben Ursachenkategorien des BAV kann eine Zuordnung nach Wahrnehmung **a**, Entscheidung **b** und Handlung **c** vorgenommen werden.



In seinem Bericht über die Signalfälle 2010 bis 2012 hat das BAV den Hergang aller gemeldeten Ereignisse analysiert und auf dieser Basis insgesamt folgende sieben Kategorien von Ursachen abgeleitet:

1. Falsche Interpretation Sammelbefehl (vgl. Abschnitt 3.1 und 5.1.2, Dilemma AD8) **b**,
2. Verwechslung von Signal in Staffel **a**,
3. Ablenkung **a**,
4. Abfahrt bei Halt zeigendem Signal **c**,
5. Irrtum, Unachtsamkeit, Signal übersehen, Müdigkeit **a**,
6. Verwechslung Zug-/Rangierfahrt **b**,
7. Kommunikation **a**.

Im dem für die Auswertung betrachteten Zeitintervall der Jahre 2010 bis 2012 verteilen sich die Ereignisse gemäss der Abbildung 27 dargestellten grafischen Auswertung. Die Zahlen der Kategorien falsche Interpretation Sammelbefehl, Abfahrt bei Halt, Irrtum, Unachtsamkeit usw. und Verwechslung Zug/Rangierfahrt weisen über die betrachteten Jahre 2010 bis 2012 tendenziell einen starken Anstieg auf. Mit einer systematischen Analyse, wie dies in Kapitel 3 am Beispiel des Eisenbahn-Systemmodells aufgezeigt wurde, können die relevanten Systemelemente bewertet und deren Rolle im System erkannt werden. Daher ist es möglich, für die Untersuchung der Signalfälle als System Hypothesen herzuleiten und diese mittels Simulatoren zu prüfen. Ein kombinierter Einsatz von Simulatoren sowohl für die Ausbildung als auch für wissenschaftliche Versuche ist auch aus wirtschaftlicher Sicht vorteilhaft.

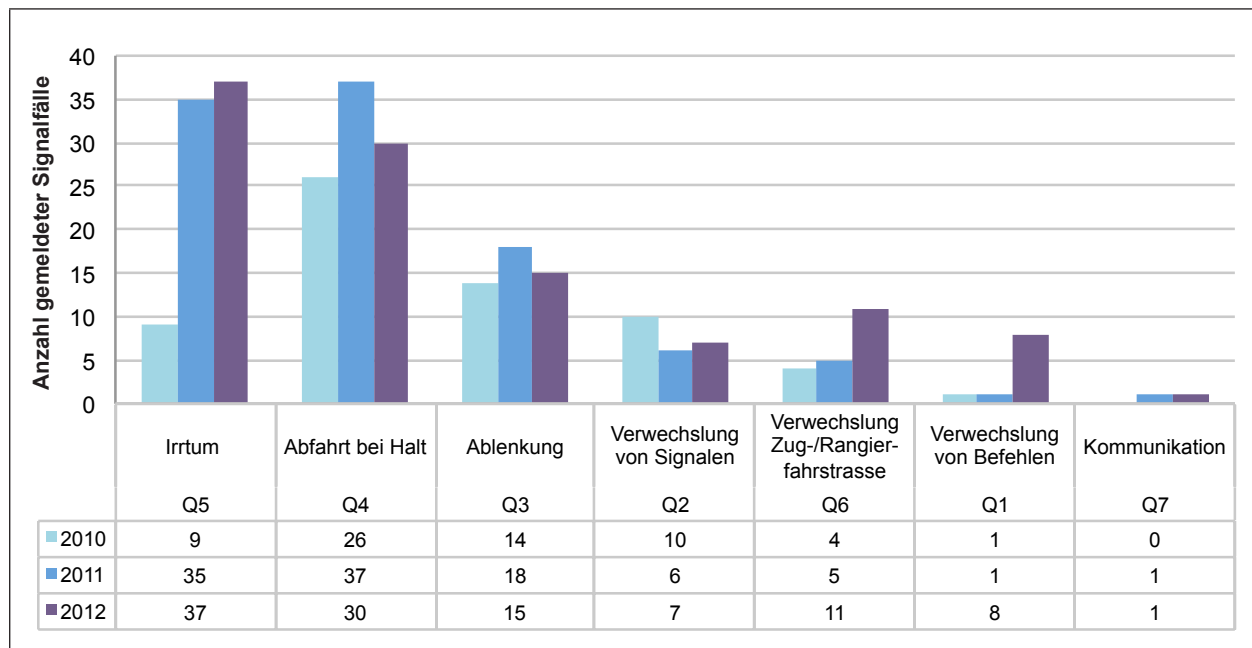


Abbildung 27: Auswertung der Signalfälle strukturiert nach bekannten Gefahrenthemen, bei welchen sich die Fälle häufen und Tendenzen festgestellt werden können. (BUNDESAMT FÜR VERKEHR, 2013b: 6)

3.6 Wechselbeziehungen bei grossen Infrastrukturprojekten (vgl. Kapitel 1: **D**)

Bei Grossprojekten erscheint es besonders schwierig, die Wirkungszusammenhänge auf Systemebene zu kontrollieren und damit unerwünschte Nebenwirkungen festzustellen, bevor sie im Betrieb zum Verhängnis werden. Im Zuge der Bahnreformen in den letzten 20 Jahren, welche unter anderem die unternehmerische Trennung der Belange Infrastruktur und Betrieb bezwecken, sind viele neue Schnittstellen entstanden. Dies kann beispielsweise dazu führen, dass Umbauten von Bahnhofsanlagen nicht in einer Weise projektiert werden, dass sich die Anlagen für die später in diesem Bahnhof verkehrenden Züge eignen. Der Bahnhof Wimmis wurde vor wenigen Jahren erneuert und unter anderem mit schienenfreien Zugängen (Unterführungen) sowie mit Gleissignalen versehen. Die Bahnsteige hingegen wurden nicht mit genügender Weitsicht konzipiert und gebaut, womit bei den dort verkehrenden Triebzügen (RABe 535 der BLS) nicht alle Türen am Bahnsteig zu stehen kommen.

3.6.1 Beispiel einer komplexen Problemstellung im Gotthard-Basistunnel (GBT)

Um solche Fälle zu verhindern werden bei Grossprojekten übergeordnete Organisationen eingesetzt, welche die Planung und den Bau bezüglich Wechselwirkungen zwischen Fachbereichen und Unternehmungen mit unerwünschten Effekten überwachen sollen. In dieser Hinsicht sei ein Beispiel aus dem gegenwärtig grössten Bauprojekt der Schweiz erwähnt, dem 57 km langen Gotthard-Basistunnel (GBT): Die Länge des Tunnels stellt hohe Anforderungen an die Sicherheit. Ausgehend vom grössten anzunehmenden Unfall, einem Brand im Zusammenhang mit gefährlichen Gütern, sind besondere Massnahmen für die Ereignisbewältigung vorgesehen. Dazu zählt die besondere Betriebsart „Reversing“ (RV) des ETCS, welche es erlaubt, mit voller Geschwindigkeit rückwärts zu fahren, damit nachfolgende Züge rasch möglichst den Gefahren eines Brandes im Tunnel entgehen können. Die Züge können sich im Blockabstand folgen. Es ist anzunehmen, dass ein in Brand geratener Zug zum Stillstand kommt. Bei dichtem Zugverkehr kommen nachfolgende Züge vor den jeweiligen Blocksignalen zu stehen. Aus Erfahrung ist es nachvollziehbar,

dass im Falle eines solchen Ereignisses mehrere Minuten verstreichen, bis der Zugverkehrsleiter die Evakuierung des Tunnels mittels Betriebsart RV anordnen kann. Bis die Betriebsart eingeführt wird und sich die Züge aus der Gefahrenzone bewegen, verstreichen weitere Minuten. Vor diesem Hintergrund erscheint es einleuchtend, dass der Prozess für den Notfall ohne Zeitverzögerung beherrscht werden muss.

In der Praxis scheint sich jedoch ein zusätzliches Dilemma abzuzeichnen: Die Verortung der Fahrleitungssektoren stimmt nicht mit den Blockabschnitten überein. Dies bedeutet, dass sich bei maximaler Zugdichte mehrere Züge im selben Fahrleitungssektor befinden. Der Brand eines Güterzuges im Simplontunnel am 9. Juni 2011 hat gezeigt, dass die Fahrleitung bei grosser Hitzeentwicklung innerhalb kurzer Zeit beschädigt und dadurch mit der Erde verbunden wird. Da die Speisung nur bei intakter Fahrleitung funktioniert, ist die Versorgung der sich am nächsten beim Brand befindlichen Züge mit Traktionsstrom unter Umständen nicht mehr möglich, womit das Konzept der Betriebsart RV versagt (Abbildung 28). Mit einem umfassenden Simulationsmodell könnten solche Schwachstellen im Vorfeld der Projekte entdeckt und behoben werden. Der Erfolg eines solchen Modells bedingt jedoch, dass es über die Grenzen bestimmter Zuständigkeiten (in diesem Fall betrifft dies die Bereiche Betriebsführung und Starkstromanlagen) aufgebaut wird, damit die Wirkungszusammenhänge erkennbar sind.

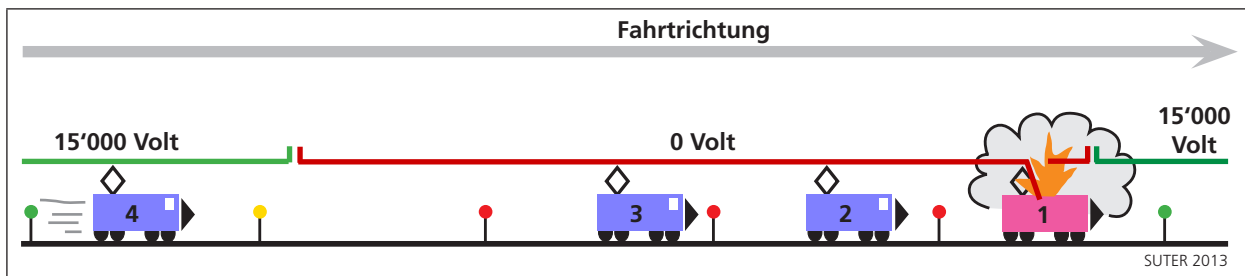


Abbildung 28: Schematische Darstellung der Zusammenhänge von Blockabschnitten und Fahrleitungssektoren im Gotthard-Basistunnel GBT. Bei einem Brandereignis kann dieser Fahrleitungssektor rasch spannungslos werden. Damit funktioniert die Betriebsart Reversing RV für die Rettung der Züge 2 und 3 nicht mehr. Es bleibt nur wenig Zeit, um zu verhindern, dass Zug 4 auch in den betreffenden Fahrleitungssektor gelangt.

3.6.2 Simulatoren ersetzen die Ausbildung in der Realität

Beim soeben behandelten Beispiel wird ein weiterer Aspekt sichtbar: Grossprojekte mit hohen Sicherheitsanforderungen bringen den Umstand mit sich, dass das operative Personal über Fachkompetenzen verfügen muss, welche es kaum je in der Praxis anwenden kann. Das wirkungsvolle Aufbauen und Erhalten dieser Fachkompetenzen wird zur Frage des Aufwandes, welche sich der Frage der Risikoakzeptanz nähert. Die Schweizerischen Bundesbahnen SBB planen, ein webbasiertes Simulationssystem aufzubauen, mit welchem rund 2 900 Mitarbeiter für den Betrieb des GBT ausgebildet werden sollen. Dazu zählen nicht nur Lokführer und Zugverkehrsleiter, sondern auch Zugpersonal und Mitarbeiter der verschiedenen Fachbereiche (Fahrbahn, Sicherungsanlagen, Bahnstrom usw.), die während dem Betrieb des Tunnels mit Unterhalts- und Instandhaltungsarbeiten betraut sind. Die Entwicklung des Simulators stellt deshalb hohe Anforderungen, da er nicht nur die fahrdienstlichen Prozesse sondern auch Abläufe für die Ereignisbewältigung im Innern des Tunnels umfasst. Dazu müssen die beteiligten Personen im Simulationsmodell den Zug verlassen können und Massnahmen in den Einrichtungen im Tunnel, wie Evakuierung von Reisenden in den Nothaltestellen, Notbedienung von Toren usw. treffen und durchführen können. Das Modell muss somit interaktive Komponenten umfassen. Ist das Modell entwickelt, stellen sich weitere Fragen zum Ausbildungskonzept. Dabei sollte auch an eine Zusammenarbeit mit einer Institution gedacht

werden, welche über viel Erfahrung mit dem aufwändigen Aufbauen, Vertiefen und Erhalten von Fachkompetenzen verfügt, welche (glücklicherweise) noch nie in der Praxis angewendet worden sind: Die Schweizer Armee. Das Mechanisierte Ausbildungszentrum MAZ in Thun verfügt über eine beträchtliche Zahl von Simulatoren für die Grund- und Weiterausbildung. Die Erkenntnisse aus den Ausbildungskonzepten sowie die Erfahrungen mit der Ausbildung von Milizpersonal müssten vor dem Hintergrund der wachsenden Komplexität bei der Betriebsführung der Eisenbahn mit einbezogen werden können. Konfrontiert mit dieser Sichtweise, zeigen die beiden erfahrenen Instruktoren Peter HAUSAMMANN und Markus WÜTHRICH (mündliche Stellungnahme am 23.01.2014) auf, dass im MAZ in erster Linie Automatismen trainiert werden. Die Schüler (in diesem Fall Panzersoldaten) müssen bestimmte Situationen erkennen, wahrnehmen und nach kurzer Überlegung richtig handeln können. Dies erfordert Ausbildungsmethoden in einer Intensität, wie sie nur mittels Simulatoren erreicht werden kann. Die Simulatoren im MAZ wurden dahingehend weiter entwickelt, dass Fehler der Schüler auch automatisch festgestellt werden können. Damit wird die Effizienz der Ausbildung nochmals gesteigert, indem das Training in der beschränkten Zeit, die zur Verfügung steht, auf die Fehler ausgerichtet werden kann. Rückmeldungen von Instruktoren zeigen, dass sich die Fehlerquote bei Übungen auf den Schiessplätzen nach der Einführung der neuen Simulatoren reduzierte. Der Einsatz von Simulatoren für den effizienten und wirkungsvollen Aufbau einer Handlungskompetenz erfordert ein klares Konzept: Es muss zu Beginn der Ausbildung genau bekannt sein, was die Schüler schlussendlich können sollen. Ferner muss die Ausbildung so strukturiert sein, dass das Training bei den kleinen, einfachen und standardisierten Handlungen beginnt, welche in fortschreitendem Masse zusammengesetzt werden, bis am Schluss Gesamtübungen durchgeführt werden können, welche die Kompetenz über alle möglichen Handlungen erfordern.

Übertragen auf die erforderliche Handlungskompetenz zur Bewältigung von Ereignissen im GBT bedeutet dies, dass das Personal vorerst alle einzelnen Handlungen und Manipulationen an den Einrichtungen des GBT (Stellwerk, Führerstand, Nothaltestellen, Fluchtwege, Belüftung, Beleuchtung, Starkstrom usw.) trainieren, um sie bei anschliessenden Übungen im Kontext richtig anzuwenden. Die in Ereignisfällen erforderliche Handlungskompetenz des Personals kann auf effiziente Weise nur mittels Simulatoren erreicht werden. Im Hinblick auf die Bedeutung von Wirkungszusammenhängen ist es notwendig, dass die Fachkompetenzen bereichsübergreifend aufgebaut werden. Das heisst beispielsweise, dass ein Lokführer auch in der Lage sein muss, im Notfall die Fahrleitung zu ertönen oder eine Weiche manuell umzustellen.

3.6.3 Notwendigkeit einer hohen Detailtreue

Der Vergleich von Problemstellungen der Eisenbahn mit solchen der Armee mag mit Befremdung aufgenommen werden. Dies kann aber auch in Indikator für die bereits mehrmals erwähnte Feststellung angesehen werden, dass die Human Factors bei der Bahn noch (zu) wenig berücksichtigt werden. REASON (2008: 159-160) hat für seine Betrachtungen über unsichere Handlungen und Unfälle die Aspekte Training, Disziplin und Führung ebenfalls anhand von militärischen Ereignissen reflektiert. Dabei stellt er fest, dass erfolgreiche Aktionen oft von einer hohen Detailtreue der Führungskräfte geprägt sind. Er zeigt mit eindrücklichen Beispielen auf, dass für den Erfolg im Ereignisfall technische Perfektion alleine nicht genügt sondern entscheidend von einer belastbaren Organisation abhängt. Konfrontiert mit einer Evakuierung eines Reisezuges im Innern des GBT bringt HAUSAMMANN das Argument der Führung ein. Er sagt, im Chaos eines solchen Notfalls könne man noch lange alle Manipulationen richtig ausführen, wenn das Personal vor Ort über keine Führungskompetenz verfüge.

3.7 Mustererfassung

Nachdem im Abschnitt 1.6.2 der Versuch einer abstrakten Beschreibung des Eisenbahn-Systemmodells unternommen wurde, geht es im folgenden darum, die relevanten Einflussgrößen aufzuzeigen und die Wechselbeziehungen darzustellen. Währenddem man die repräsentativen Einflussfaktoren für ein Eisenbahn-Systemmodell (vgl. Abbildung 19 in Abschnitt 2.9) bezüglich der „Entitäten“ Materie, Energie und Informationen, welche sich mit Variablen ausdrücken lassen, überprüft, stehen bei den Systemelementen aus dem Bereich der Umwelt vor allem die Schnittstellen und der Kulturraum im Vordergrund. Beide Elemente weisen offenbar zahlreiche relevante Wechselwirkungen mit den übrigen Systemelementen auf, wenn man beispielsweise an das Thema der Bahnübergänge oder an die Siedlungsentwicklung in Bahnhofnähe denkt. Die übrigen Systemelemente der Umwelt lassen sich in diesem Kontext auf die zwei Elemente „natürliche Umwelt“ und „Naturgefahren“ zusammenfassen. Bei den Systemelementen der Infrastruktur und des Betriebs wird bei genauer Betrachtung erkennbar, dass auf Grund interner Wechselwirkungen eine weitere Unterteilung erforderlich ist. Demnach müssen die Sicherungsanlagen in „Signale/Aussenanlagen“, „Zugbeeinflussungssysteme“, „Stellwerke“ und „Zugverkehrsleiter“ unterteilt werden. Bei den Zügen ist zwischen den „Fahrzeugen“ und dem „Lokführer“ zu unterscheiden.

3.7.1 Analyse der Vernetzung im Eisenbahnsystem

Für die Untersuchung der Wechselwirkungen beim kybernetischen Ansatz kommt die Einflussmatrix von VESTER zur Anwendung, welche in Abschnitt 2.3 vorgestellt wird. Dieser Ansatz eignet sich besonders auf der übergeordneten Systemebene und bei komplexen Problemstellungen. Bei der vorliegenden Arbeit müssen solche Überlegungen zu Einflussgrößen und Wechselwirkungen vor allem im Bereich der Anwendung von Simulatoren und im Zusammenhang mit den Experimenten mit Simulatoren angestellt werden.

Die grafische Darstellung in Abbildung 29 zeigt die Vernetzung der insgesamt elf relevanten Elemente in unserem Eisenbahn-Systemmodell. Mit dieser Grafik können erste Rückschlüsse über die Dynamik des Systems gemacht werden, indem das System auf Rückkoppelungen hin untersucht wird. NINCK/BÜRKI/HUNGERBÜHLER/MÜHLEMANN (2004: 79f) zeigen die Bedeutung von Rückkoppelungen bezüglich der Dynamik im System auf und unterscheiden zwischen direkter und indirekter Rückkoppelung. Bei ersteren beeinflussen sich zwei Größen gegenseitig, bei letzteren, auch Rückkoppelungsschleife genannt, wirken mehrere Systemkomponenten in einer Kausalkette zusammen. Ferner wird zwischen negativer und positiver Rückkoppelung unterschieden, bei welchen die Gesamtbewertung negativ bzw. positiv ausfällt. Während die negative Rückkoppelung stabilisierend auf das System wirkt, verursachen positive Rückkoppelungen im Gesamtsystem gleichgerichtete Verstärkungen oder Abschwächungen. Dies kann entweder zu (exponentiellem) Wachstum, einer aufschaukelnden Wirkung oder zu (exponentiellem) Zerfall, einer hemmenden Wirkung führen.

In Abbildung 29 fällt bereits auf, dass zwischen den Elementen Fahrplan und Kulturraum eine besondere Dynamik besteht, indem sie zusammen eine direkte, positive Rückkoppelung bilden. Dies kann dahingehend interpretiert werden, indem ein Zuwachs beim Fahrplanangebot auch ein Wachstum im Kulturraum (Wachstum der Einwohnerzahl) bewirkt und umgekehrt. Die Wechselwirkungen zwischen den Elementen Zugverkehrsleiter bzw. Lokführer auf der einen sowie der Betriebsführung auf der anderen Seite sind ebenfalls je als direkte, positive Rückkoppelung ausgebildet. Verbesserungen bzw. Verschlechterungen bei den Leistungen der Betriebsführung können sich demnach in gleicher Weise auch bei Leistungen der genannten Personalkategorien auswirken.

So zum Beispiel kann eine falsche oder unzeitige Information seitens Betriebsführung eine Fehlehandlung von Lokführer oder/und Zugverkehrsleiter zur Folge haben oder begünstigen.

Ein Beispiel dazu stellt Abschnitt 3.1 mit der Schilderung des Ereignisses vom 24. November 2011 am Bahnhof Thun (Abbildung 22 bis Abbildung 23) dar, indem der Zugverkehrsleiter dem Lokführer eine falsche Information über die voraussichtliche Abfahrtszeit erteilt hat, worauf der Lokführer zur fraglichen Zeit ein Signal falsch interpretierte. Weiter ist in der Grafik zu erkennen, dass die meisten Beziehungen zwischen Elementen verstärkende Wirkung zeigen, nur gerade die Naturgefahren wirken jeweils hemmend auf die Betriebsführung und auf den Fahrplan ein.

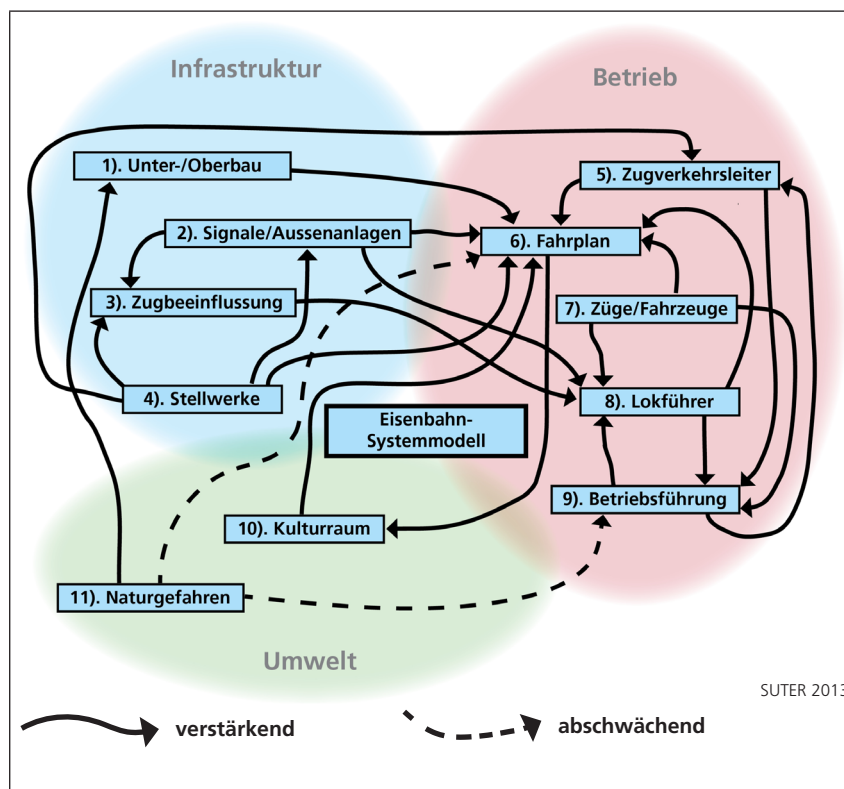


Abbildung 29: Grafische Darstellung des Eisenbahn-Systemmodells als Netzwerk.

3.7.2 Einflussmatrix für das Eisenbahn-Systemmodell

Die Tabelle 7 zeigt die Einflussmatrix für das nach letzten Erkenntnissen aufgestellte sowie bezüglich Wechselwirkungen untersuchte Eisenbahn-Systemmodell. Nachdem die einzelnen Einflussgrößen qualitativ bewertet worden sind, werden aus den einzelnen Werten die Aktiv- und Passivsummen gebildet. Damit hat man die Grundlage für grafische Darstellung des Systems, um die Rollen der einzelnen Systemelemente auf übersichtliche Weise zu erkennen.

aktive Beziehung		von → auf											Quotient Aktivsumme/Passivsumme	
		1). Unter-/Oberbau	2). Signale/Aussenanlagen	3). Zugbeeinflussung	4). Stellwerke	5). Zugverkehrsleiter	6). Fahrplan	7). Züge/Fahrzeuge	8). Lokführer	9). Betriebsführung	10). Kulturraum	11). Naturgefahren		Aktivsumme
1). Unter-/Oberbau			1	1	2	2	3	1	2	2	2	1	17	1.3
2). Signale/Aussenanlagen		1		1	3	2	2	3	3	2	0	1	18	1.1
3). Zugbeeinflussung		1	2		2	2	2	3	3	1	0	0	16	1.1
4). Stellwerke		1	3	2		3	2	2	1	2	0	0	16	0.8
5). Zugverkehrsleiter		0	2	1	3		1	1	3	3	1	0	15	0.7
6). Fahrplan		2	2	2	1	3		2	3	3	2	0	20	0.9
7). Züge/Fahrzeuge		2	1	2	2	2	2		3	2	2	0	18	0.9
8). Lokführer		0	1	1	2	3	2	3		2	1	0	15	0.7
9). Betriebsführung		2	2	2	2	3	3	1	3		1	1	20	1.0
10). Kulturraum		2	1	1	1	0	3	2	0	1		1	12	1.2
11). Naturgefahren		2	1	1	1	2	2	2	1	3	1		16	4.0
Passivsumme		13	16	14	19	22	22	20	22	21	10	4		
Produkt Aktivsumme*Passivsumme		221	288	224	304	330	440	360	330	420	120	64		

Bewertungsskala:

- 1 schwache Einwirkung
- 2 mittlere Einwirkung
- 3 starke Einwirkung
- 0 keine Einwirkung

SUTER 2013

Tabelle 7: Einflussmatrix mit den gegenseitigen Einwirkungen zwischen den Systemelementen des Eisenbahn-Systemmodells der vorliegenden Arbeit. (Darstellung nach Angaben aus VESTER 2005: 226)

3.7.3 Wirkungsgefüge in grafischer Darstellung

Bei rein technischen Systemen entspricht die Mustererfassung den Studien und Analysen, die im Vorfeld des Systementwurfs durchgeführt werden. Dabei müssen ebenfalls Einflussgrößen untersucht und die Machbarkeit untersucht sowie die Risiken im Zusammenhang mit der Entwicklung des Systems abgeschätzt werden. (SCHNIEDER 1999: 44)

Die grafische Darstellung in Abbildung 30 ist in vier Quadranten unterteilt, welche die Bereiche der aktiven, kritischen, puffernden und reaktiven Elemente darstellen. Bei der Betrachtung der Grafik fällt auf, dass der Schwerpunkt der Systemelemente im Bereich der kritischen Elemente zu liegen scheint. Lediglich die beiden Elemente der Naturgefahren und des Kulturraums liegen unterhalb des Mittelwerts der Passivsumme (links der Mitte). Während sich der Kulturraum im (gelb markierten) Neutralbereich liegt, befinden sich die Naturgefahren im Bereich zwischen den aktiven und den puffernden Elementen. Diese grafische Darstellung der Rollenverteilung erlaubt nun die Untersuchung der gesamten Vernetzung des Eisenbahn-Systemmodells in Bezug auf seine Dynamik.

In Abbildung 26 ist deutlich sichtbar, dass sich der Schwerpunkt des Eisenbahn-Systemmodells im kritischen Bereich befindet. Die Konzentration mehrerer zusammenhängender Systemelemente im kritischen Bereich weist auf eine hohe Verwundbarkeit des Systems hin. Veränderungen an einzelnen Elementen kann bewirken, dass das System leicht ausser Kontrolle gerät.

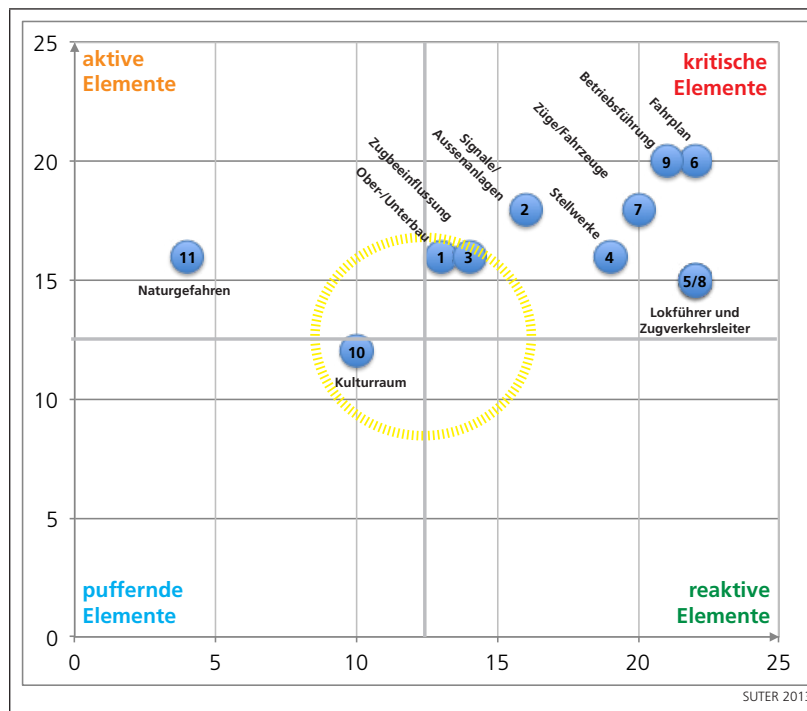


Abbildung 30: Grafische Darstellung der Rollenverteilung der einzelnen Systemelemente. (Darstellung nach Angaben aus VESTER 2005: 234-235)

3.8 Interpretation und Bewertung

Aus der Einflussmatrix in Tabelle 7 können wichtige Schlüsse über die Relevanz der einzelnen Elemente in Bezug auf das Gesamtsystem gezogen werden, wie dies in Abschnitt 2.3 kurz vorgestellt wurde. Aus den Produkten Aktivsumme mal Passivsumme erfahren wir, wie stark die Elemente am Systemverhalten beteiligt sind, sie bestimmen den Grad der Vernetzung. Die Quotienten Aktivsumme durch Passivsumme hingegen sagen aus, in welchem Masse sich die Elemente auf Veränderungen äussern, sie bestimmen den Grad der Aktivität. (VESTER, 2005: 230f) Somit können die Systemelemente hinsichtlich dieser vier daraus resultierenden Typen bewerten werden:

- Quotient Aktivsumme durch Passivsumme > 1 : Aktive Elemente
 - Dies trifft auf die Elemente *Unter-/Oberbau*, *Signale/Aussenanlagen*, *Zugbeeinflussung*, *Kulturraum* sowie *Naturgefahren* zu. Bei Veränderungen am System wirken diese Elemente stärker auf die anderen Elemente ein, als sie von diesen beeinflusst werden. Diese Elemente weisen einen hohen Grad der Aktivität auf.
- Quotient Aktivsumme durch Passivsumme < 1 : passive Elemente
 - Dies trifft auf die Elemente *Stellwerk*, *Zugverkehrsleiter*, *Fahrplan*, *Züge/Fahrzeuge* und *Lokführer* zu. Bei Veränderungen am System wirken diese Elemente weniger stark auf die anderen Elemente ein, als sie von diesen beeinflusst werden. Somit ist ihnen ein tiefer Grad der Aktivität zuzuordnen.
- Produkt Aktivsumme mal Passivsumme > 282 (Schwerpunkt): kritische Elemente
 - Dies trifft auf die Elemente *Signale/Aussenanlagen*, *Stellwerke*, *Zugverkehrsleiter*, *Fahrplan*, *Züge/Fahrzeuge*, *Lokführer* und *Betriebsführung* zu. Sie beeinflussen bei Veränderungen das System stark, währenddem sie gleichzeitig stark beeinflusst werden. Demnach weisen sie eine hohen Grad der Vernetzung auf.
- Produkt Aktivsumme mal Passivsumme < 282 (Schwerpunkt): stille Elemente
 - Dies trifft demnach auf die Elemente *Unter-/Oberbau*, *Zugbeeinflussung*, *Kulturraum* und *Naturgefahren* zu. Sie beeinflussen die übrigen Elemente wenig und werden auch wenig von ihnen beeinflusst. Ihr Grad der Vernetzung ist gering.

3.8.1 Eigenschaften der Systemelemente im Netzwerk

Werden nun die Ergebnisse dieser Bewertung der Aktivität und Vernetzung der Systemelemente paarweise nach Aktivität (Quotient) und Vernetzung (Produkt) betrachtet, können den elf Systemelementen folgende Eigenschaften zugeordnet werden. Auf diese Weise lassen sich die Systemelemente charakterisieren. Der Tabelle 8 ist zu entnehmen, dass die *Signale/Aussenanlagen* sowie die *Betriebsführung* im System sowohl einen hohen Grad der Aktivität aufweisen als auch stark vernetzt sind. Bei diesen Elementen ist besondere Vorsicht geboten, da sie unkontrollierte Aufschaukelungen bewirken und das System gar zum Kippen bringen können. Elemente mit gegenteiligen Eigenschaften sind keine zu verzeichnen. Durch schwache Aktivität und starke Vernetzung zeichnen sich die Systemelemente *Stellwerke*, *Zugverkehrsleiter*, *Fahrplan*, *Züge/Fahrzeuge* und *Lokführer* aus. Diese Elemente können deutliche Zustandsveränderungen im Gesamtsystem bewirken. Deshalb können sie bei Problemlösungen gezielt als Indikatoren dienen. Starke Aktivität bei schwacher Vernetzung hingegen weisen die Systemelemente *Unter-/Oberbau*, *Zugbeeinflussung*, *Kulturraum* und *Naturgefahren* auf. Durch die schwache Vernetzung kann mit solchen Elementen eine gezielte Hebelwirkung erzeugt werden. Die Eingriffe müssen jedoch von ausserhalb des Systems getätigt werden. (NINCK/BÜRKI/HUNGERBÜHLER/MÜHLEMANN, 2004: 95-96)

Systemelement	Aktivität	Vernetzung	Eigenschaften
Unter-/Oberbau	stark	schwach	Hebelwirkung durch externen Eingriff
Signale/Aussenanlagen	stark	stark	kann ausser Kontrolle geraten
Zugbeeinflussung	stark	schwach	Hebelwirkung durch externen Eingriff
Stellwerke	schwach	stark	Indikator: Zustandsveränderungen im System
Zugverkehrsleiter	schwach	stark	Indikator: Zustandsveränderungen im System
Fahrplan	schwach	stark	Indikator: Zustandsveränderungen im System
Züge/Fahrzeuge	schwach	stark	Indikator: Zustandsveränderungen im System
Lokführer	schwach	stark	Indikator: Zustandsveränderungen im System
Betriebsführung	stark	stark	kann ausser Kontrolle geraten
Kulturraum	stark	schwach	Hebelwirkung durch externen Eingriff
Naturgefahren	stark	schwach	Hebelwirkung durch externen Eingriff

SUTER 2014

Tabelle 8: Interpretation der Systemelemente bezüglich ihrer Aktivität und Vernetzung sowie ihrer Eigenschaften auf Systemebene bei Veränderungen.

3.8.2 Bewertung von Wechselwirkungen

Aus der Bewertung der gegenseitigen Einwirkungen zwischen den Systemelementen in Abbildung 30 geht hervor, dass die beiden Personalkategorien *Lokführer* und *Zugverkehrsleiter* identische Aktiv- und Passivsummen aufweisen und demnach in der Grafik an der gleichen Stelle liegen. Ihre Lage, im kritisch-reaktiven Bereich interpretiert VESTER (2005: 235) als besonders gefährlich, wenn sich dort zusammenhängende Bündel befinden. Lokführer und Zugverkehrsleiter als Systemelemente hängen in unserer Betrachtung einerseits direkt und andererseits über die *Betriebsführung* zusammen. Man kann also davon ausgehen, dass diesen Systemelementen bei Eingriffen in das System ganz besondere Aufmerksamkeit beizumessen ist. Diese Annahme wird auch durch unsere Feststellung im vorangehenden Abschnitt gestützt, dass Lokführer und Zugverkehrsleiter über die Betriebsführung eine positive Rückkoppelung darstellen und daher eine besondere potentielle Dynamik aufweisen: Veränderungen können dazu führen, dass das System durch sich aufschaukelnde Effekte leicht ausser Kontrolle gebracht wird. Daraus geht eine wichtige Erkennt-

nis hervor, die für das Ausarbeiten von Szenarien für die Anwendung der Simulationsmodelle von grosser Bedeutung ist.

Die Systemelemente *Zugbeeinflussung* und *Fahrplan* sind im Bereich der kritischen Elemente zu finden, welche sich nach VESTER (2005: 235) als Initialzündung im Sinne von Beschleuniger und Katalysatoren eignen. Aus Erfahrung wissen wir, dass die Stabilität des Fahrplans besonders bei zunehmender Zugsdichte empfindlich auf externe Einflüsse reagiert und damit hohe Anforderungen an die Betriebsführung stellt. Die Sensibilität der Wechselwirkung zwischen Zugverkehrsleiter und Lokführer lassen sich aber auch anhand von Ereignissen nachvollziehen, wie das in vorangehendem Abschnitt erwähnte und im Abschnitt 3.1 geschilderte Ereignis vom Bahnhof Thun zeigt. Obwohl die Information über die voraussichtliche Abfahrtszeit des Güterzuges keine rechtliche oder sicherheitstechnische Relevanz aufweist, ist es vorstellbar, dass sie das Verwechseln des für den anderen Zug Fahrt zeigende Gruppensignal auf Grund einer falschen Erwartungshaltung begünstigt.

Mit diesen Erkenntnissen aus der Bewertung der Systemelemente aus der Einflussmatrix und der Interpretation der grafischen Rollenverteilung lassen sich bereits erste Bedingungen für die Überlebensfähigkeit des Systems sowie Grundlagen für die Beurteilung von Wenn-Dann-Risiken und -Chancen ableiten.

- Starke Eingriffe in die *Betriebsführung* und in die *Signale* bzw. *Aussenanlagen* können ausser Kontrolle geraten und die Überlebensfähigkeit des gesamten Systems gefährden,
- Externe und gezielte Eingriffe in den *Ober-/Unterbau*, die *Zugbeeinflussung*, den *Kulturraum* und die *Naturgefahren* erzeugen eine Hebelwirkung im System, die sich kontrollieren lässt. Es sind kaum unerwünschte Nebeneffekte zu erwarten,
- Die Elemente *Stellwerke*, *Zugverkehrsleiter*, *Fahrplan*, *Züge/Fahrzeuge* sowie *Lokführer* eignen sich als Indikatoren, da sich schnell Zustandsveränderungen im Gesamtsystem zeigen. Direkte Veränderungen an diesen Elementen zeigen durch ihre geringe Aktivität wenig Wirkung. Diese Elemente werden oft verändert, um unerwünschte Symptome zu bekämpfen,
- Werden innerhalb des Wirkungsgefüges des Systems unkontrollierte Veränderungen bei den *Lokführern* und *Zugverkehrsleitern* in Verbindung mit der Betriebsführung vorgenommen, besteht das Risiko von gefährlichen Aufschaukelungen (positive Rückkopplung zwischen diesen Elementen),
- Umgekehrt stellen diese Elemente eine Chance für die Stabilisierung des Systems dar.
- Veränderungen bei den Elementen *Zugbeeinflussung* und *Fahrplan* sind ebenfalls mit grosser Vorsicht vorzunehmen, da sie systeminterne Prozesse beschleunigen und verstärken können.

Abgesehen von den Konsequenzen auf die Gestaltung des Eisenbahn-Systemmodells bilden diese bisherigen Erkenntnisse die Basis für die Szenarien, welche zum Testen der Simulatoren zwecks Rückschlüssen auf die Modellierung, Datenaufbereitung und Datenerhebung ausgearbeitet werden müssen. An dieser Stelle sei daran erinnert, dass es bei den vorliegenden Betrachtungen um ein Modell des Eisenbahn-Systems geht. Es handelt sich um eine Abbildung der Realität, die sich sozusagen im Schatten des realen Eisenbahnsystems befindet.

3.9 Fazit der theoretischen Analysen

„Trotz (und wegen!) der hohen Automatisierung kommt es zu Unfällen, die häufig menschlichem Versagen zugeschrieben werden.“ (HAMMERL/FELDMANN 2009: 314) Im diesem Kapitel wurde versucht, anhand von Beispielen aus der Praxis ein grundsätzliches Verständnis für Wirkungszusammenhänge im Eisenbahnsystem zu fördern. Dies soll es ermöglichen, die Betriebsführung der Eisenbahn als komplexes System aufzufassen. Die Perspektive, aus welcher der Systembegriff im Zusammenhang mit Problemstellungen beim Eisenbahnbetrieb in dieser Arbeit betrachtet wird, unterscheidet sich von der technischen Sichtweise. So werden beispielsweise für den Nachweis von Konformitäten bei elektronischen Stellwerken die Systeme als endliche Automaten betrachtet, bei welchen man die zugänglichen Zustände untersucht. (ANTONI 2009: 105) Die kausalen Beziehungen zu menschlichem Handeln werden dabei über Schnittstellen zur Systemumwelt geleitet.

Aus den Betrachtungen dieses Kapitels geht hervor, dass die Komplexität im Eisenbahnbetrieb vor dem Hintergrund der Automatisierung offensichtlich im Wachstum begriffen ist. Dazu trägt auch das Wegfallen der persönlichen Zusammenarbeit der sicherheitsrelevanter Berufskategorien bei. Auch die Spezialisierung der Lokführer, indem sie getrennt nach Verkehrsarten (Güterverkehr, S-Bahn, Regionalverkehr, Fernverkehr usw.) eingesetzt werden, birgt potentielle Risiken durch neue Stressfaktoren wie Monotonie bei der Arbeit. (CHEVALIER, mündliche Stellungnahme am 13.01.2014) Die Untersuchung von Ereignissen zeigt, dass im Zusammenhang mit dem Einfluss menschlicher Faktoren auf das System heute viele Fragen offen bleiben, obwohl bei den meisten Unfällen und Ereignisse menschliche Handlungen ursächlich im Mittelpunkt stehen. Trotz dieser Gewissheit gibt es keine durchgängige Forschung, welche sich mit den Interaktionen zwischen Mensch und Maschine befasst. (HAMMERL 2011:40)

Im Eisenbahnsystem wird Komplexität vor allem an den Schnittstellen Mensch-Maschine hervorgerufen. Diesbezüglich zeigt das Ergebnis der Analyse, dass die Systemelemente *Betriebsführung* und *Signale/Aussenanlagen* sowohl starke Vernetzungen als auch starke Aktivitäten zeigen. Ebenfalls stark aktiv sind unter anderem die Elemente *Lokführer*, *Zugverkehrsleiter*, *Stellwerke* und *Fahrplan*. Dies lässt den Schluss zu, dass für Untersuchungen von komplexen Problemstellungen im Eisenbahnsystem integrierte Simulatoren unter Berücksichtigung aller oben genannten Systemelemente notwendig sind.

Die Automatisierung von Sicherungsanlagen bei der Bahn stellt hohe Anforderungen an die Zuverlässigkeit technischer Komponenten. Dabei werden punktuelle Schwachstellen, bei welchen ein hohes Schadenspotential von einer einfachen Fehlhandlung abhängen kann, kaum mehr sichtbar. Grosse und komplexe Eisenbahnprojekte müssen daher ganz besonders auch auf die Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Fachbereichen ausgerichtet sein, damit solche Schwachstellen rechtzeitig erkannt werden, um die betrieblichen Prozesse entsprechend zu gestalten. Für die Untersuchungen im System sowie für eine hohe Ausbildungseffizienz spricht der Einsatz von Simulatoren.

4. Anforderungen an das Simulationsinstrumentarium

Dieses Kapitel hat zum Ziel, die für das Erzeugen von Ergebnissen dieser Forschungsarbeit zu Grunde liegenden Methoden darzustellen. Die Entwicklung und Untersuchung der wesentlichen Arbeitsschritte, die in Absatz 1.7 und Abbildung 5 vorgestellt wurden, erfordern sowohl die Anwendung von quantitativen als auch qualitativen Methoden. Oft sind die beiden Arten von Forschungsmethoden eng miteinander verbunden: Nachdem die verbalen, visuellen und numerischen Daten erhoben sind, müssen die für die Auswertung geeigneten statistischen, mathematischen und empirischen Methoden ausgewählt und angewendet werden. Für zahlreiche Experimente im Rahmen dieser angewandten Forschung kommen folgende Instrumente zum Einsatz:

- DESM-Middleware (in Entwicklung, Abschnitt 4.2)
- Stellwerke und Führerstände im Forschungslabor (Abschnitt 4.3)
- Programm QRailScan für die videobasierte Datenerhebung (Abschnitt 4.4)
- Das Datenformat railML (Abschnitt 4.5)
- Die Fahrsimulatoren FASI, LOCSIM und ZUSI 3 (Abschnitt 4.6)
- Die Teststrecke im Raum Obermatt (Abschnitt 4.10)

4.1 Lösungsstrategie

Die Ergebnisse aus den vorangehenden Abschnitten führen zum Entwurf von möglichen Lösungen für das Eisenbahn-Systemmodell. NINCK/BÜRKI/HUNGERBÜHLER/MÜHLEMANN, 2004: 135-136) zeigen vier Schritte auf, welche in Verbindung mit einem kreativen Umfeld durchlaufen werden müssen:

1. Problem abgrenzen, ohne es in einen zu engen Rahmen zu stecken (Problemdefinition),
2. Spontanlösungen laufend festhalten,
3. Lösungsideen ausarbeiten,
4. Lösungen bewerten.

Die Betrachtung der Eisenbahn auf der Systemebene verfolgte das Ziel, die einzelnen für die Modellierung relevanten Systemelemente zu erkennen und in ihr Wirkungsgefüge zu stellen, um sie als Gesamtheit zu verstehen. Die der Gestaltung eines Eisenbahn-Systemmodells zu Grunde liegende Problemstellung besteht im Wesentlichen darin, deren Elemente, Prozesse und Wechselwirkungen strukturell, kausal und funktionell, so zu beschreiben, dass alle notwendigen Informationen für ihre Abbildung mit technischen Mitteln vorliegen. Die Wahl der formalen Mittel ist so zu treffen, dass sich insbesondere der mit der Beschreibung resultierende Abstraktionsgrad den Anforderungen bezüglich Verwendung des Modells Rechnung trägt. Dabei muss berücksichtigt werden, dass das Modell auch Forschungszwecken im System dienen soll, für welche die Sicht auf Sensitivitäten gewährleistet sein muss. Dies erlaubt die Untersuchung und damit das Generieren von Erkenntnissen über Alternativen im Systemverhalten. Zusammenfassend kann die Definition der Problemstellung wie folgt lauten:

Modellierung des Eisenbahnsystems mit seinen relevanten Elementen, Prozessen und Wechselwirkungen als Grundlage für die Forschung mit Sicht auf die Sensitivitäten, welche die Funktionsfähigkeit des Systems beeinflussen.

Rückblickend auf Abschnitt 2.4 (Beschreibungsmittel) sowie auf Abbildung 20 in Abschnitt 2.10, welche die Arbeitsschritte für die Modellierung vor dem Hintergrund der theoretischen Betrachtungen beschreibt, kann an dieser Stelle festgehalten werden, dass sich als formale Methode für die Beschreibung von Prozessen sowohl an den Schnittstellen Zugverkehrsleiter - Stellwerk als auch Lokführer - Führerstand die Anwendung von Petrinetzen eignet. Aus der Analyse von Vernetzung und Wirkungsgefüge des Systems in den vorangehenden Abschnitten geht hervor, dass insbesondere im Zusammenwirken von Lokführer und Zugverkehrsleiter vor dem Hintergrund der Betriebsführung Sensitivitäten vorhanden sind. Diese Tatsache lässt sich auch an den Problemstellungen über die Komplexität in Kapitel 3 nachvollziehen, welche sich in der Regel nicht auf linear-mathematischem Weg untersuchen lassen, da sie nicht quantifizierbare Einflussgrößen aufweisen. Viele Fragen, die aus solchen Problemstellungen hervor gehen, können kaum mit anderen Mitteln so tiefgründig wie unter Anwendung von Simulationen beantwortet werden. Da die wichtigsten operativen Prozesse im Eisenbahnbetrieb entweder direkt oder über Automatisierungssysteme in der Hand von Zugverkehrsleitern oder Lokführern liegen, müssen die für die Untersuchung von solchen Problemstellungen herbei gezogenen Simulationsmodelle gleichzeitig die Prozesse beider Berufskategorien enthalten.

Das Eisenbahn-Systemmodell, das für Simulationen im oben beschriebenen Sinne eingesetzt werden soll, muss zwingend über die Schnittstellen Mensch-Maschine sowohl von Lokführer als auch von Zugverkehrsleiter verfügen, damit Probanden beider Berufe in die Simulation mit einbezogen werden können. In Abbildung 31 sind die notwendigen Schnittstellen für eine integrierte Simulation mit Pfeilen dargestellt.

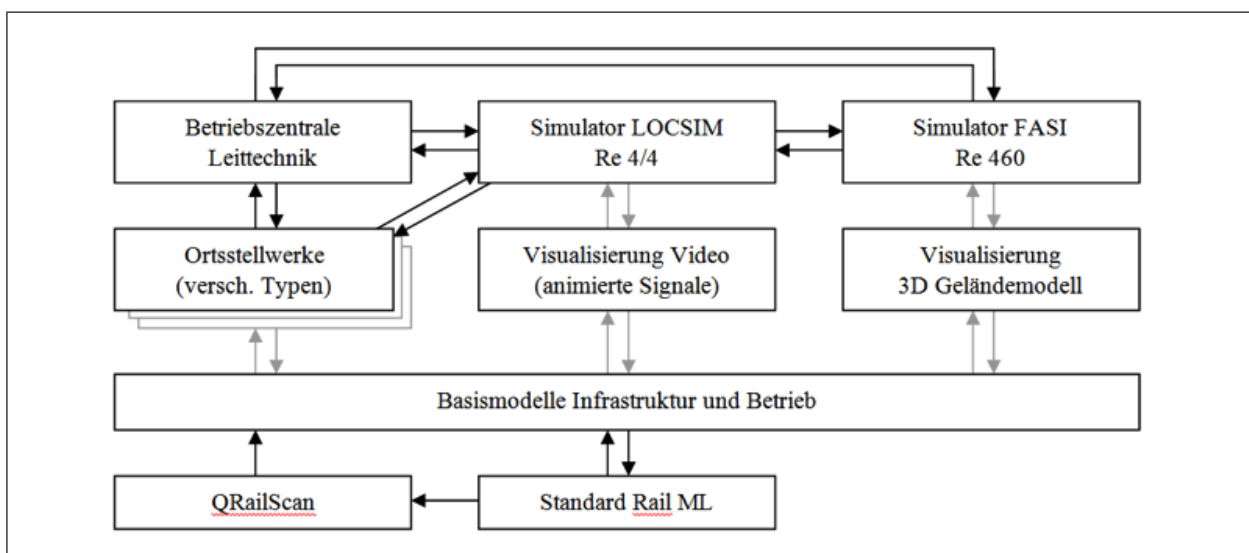


Abbildung 31: Übersicht des nachgebildeten Informationsflusses der Gesamtsimulation im Labor. Die schwarzen Pfeile zeigen die zu entwickelnden Schnittstellen, während die grauen Pfeile Schnittstellen vorhandener Systeme (zum Beispiel innerhalb des Fahrsimulators) repräsentieren. (SUTER/STRAUBE/RIESEN, 2012: 169)

Im Forschungslabor wurde ein Lösungsansatz entwickelt, diskutiert und umgesetzt, indem das im Abschnitt 4.3 beschriebene Stellwerk der Signalstation Obermatt mit dem im Abschnitt 4.6.1 vorgestellten Fahrsimulator LOCSIM der Berner Fachhochschule Biel verbunden wurde. Der LOCSIM enthält ein detailgetreues, videobasiertes Abbild der Umwelt und ein digitalisiertes Abbild der Infrastruktur. In einem ersten Schritt wurde das elektromechanische Vertikalschalter-

werk der Station Obermatt aus dem Jahr 1952 originalgetreu aufgebaut. Dieses Stellwerk umfasst eine Darstellung von Infrastrukturobjekten und eine hinreichend genaue Positionsanzeige für alle verkehrenden Fahrzeuge auf dem zur Verfügung stehenden Schienennetz. Das Stellwerk und der LOCSIM werden für die Untersuchungen in der Gesamtsimulation miteinander kombiniert. Dabei umfasst die Integration des Stellwerks verschiedene technische Schnittstellen, die für diese Oberfläche Mensch-Maschine nicht sofort erkennbar sind. Das Modell des Stellwerks wird in die abgebildete Infrastruktur und die dahinter liegende Stellwerklogik getrennt. (SUTER/STRAUBE/RIESEN, 2012: 169-170)

Die Stellwerklogik basiert auf der Verschlusstabelle. Auf dieser Tabelle sind alle Abhängigkeiten des Stellwerks mit der gesamten Infrastruktur vorhanden. Sie verhindert das Einstellen von inkonsistenten oder ungewollten Zuständen für die Schnittstelle Mensch-Maschine (Stellwerk). Dadurch wird die Sicherheit im Schienenverkehr bis zu einer kritischen Ebene gewährleistet. Es ist heute möglich, die Tafel elektronisch zu erfassen und abzubilden. Im Rahmen dieser Forschungsarbeit fehlen die zeitlichen und finanziellen Ressourcen, um die für das Stellwerk verwendete Modellierungsmethode näher betrachten und untersuchen zu können.

Das Modell wird für eine universelle Anwendbarkeit selbst entwickelt. Für die Struktur wird eine Matrix angewendet, die für jeden Stellwerktyp die funktional spezifischen Grundzüge enthält, aber individuell erfasst werden muss. Für die Modellierung werden zwei verschiedene Markup Language (ML) in Betracht gezogen: Die Extensible Markup Language (XML) und die Web Ontology Language (OWL). (SUTER/STRAUBE/RIESEN, 2012: 169-170)

Für die Ausgestaltung der Stellwerke und Führerstände für den integrierten Simulator stehen bezüglich Detaillierungsgrad (Modellauflösung) grundsätzlich folgende Varianten zur Auswahl:

- Visualisierung des Geländemodells
 - videobasierter Ansatz,
 - digitales 3D Modell,
 - Verwendung von Monitoren,
 - Frontprojektion auf Leinwand,
 - Rückprojektion auf Leinwand,
 - flache Leinwand/Monitor (Sicht nur nach vorne),
 - gebogene Leinwand/Monitor (Sicht nach vorne und seitlich).
- Detaillierungsgrad des Führerstands und des Stellwerks:
 - abgeschlossene oder offene Kabine,
 - Vollständigkeit und Authentizität der Anzeige- und Bedienungselemente,
 - Verwendung von Originalbauteilen oder Vereinfachungen,
 - Ausbildung der Akustik.
- Fahrdynamik (nur Fahrsimulator):
 - Bewegungssystem der Kabine mit Anzahl Freiheitsgraden,
 - Bewegung durch Gleisgeometrie (Berücksichtigung der Kurvenüberhöhungen bei der Visualisierung)
 - statisches Modell ohne Bewegung

4.2 Integrierte Simulationsmodelle

Im Gebiet der Eisenbahn gibt es heute eine grosse Anzahl an verschiedenen Simulationsprogrammen. Die Fahrsimulatoren bilden den Arbeitsplatz des Lokführers auf mehr oder weniger detailierte und realistische Weise ab und visualisieren die Fahrt auf Eisenbahnstrecken unter Berück-

sichtigung des Verhaltens des geführten Zuges. Andere Programme dienen dazu, die Funktionen von Stellwerken nachzubilden oder simulieren komplexe betriebliche und technische Prozesse und Abläufe. In den meisten Fällen werden Simulationen zur Aus- und Weiterbildung von Personal oder für die Visualisierung bestimmter Funktionen oder Abläufe benutzt. Da die Entwicklung solcher Programme auf einen bestimmten Anwendungsbereich ausgerichtet sein muss und in der Regel nicht bereichsübergreifend erfolgen kann, verfügen sie nur selten über Schnittstellen für den Austausch von Informationen.

Für die vorliegende Arbeit wird ein Instrument im Sinne einer Middleware entwickelt, mit welchem sich verschiedene Fahr- und Stellwerksimulatoren verbinden lassen. Der Entwickler und Elektroingenieur Fabian RIESEN (mündliche Stellungnahme am 16.01.2014) stellt hinsichtlich bestehender Bahnsimulatoren fest, dass sie nicht offen sondern als „single-box“ konstruiert sind. Es war bisher nicht vorgesehen, dass die Simulationsprogramme mit ihrer Systemumwelt kommunizieren können.

Das zu entwickelnde Tool wird in einer ersten Phase „Dispatcher“ genannt und funktioniert im Prinzip gemäss nachstehender Abbildung:

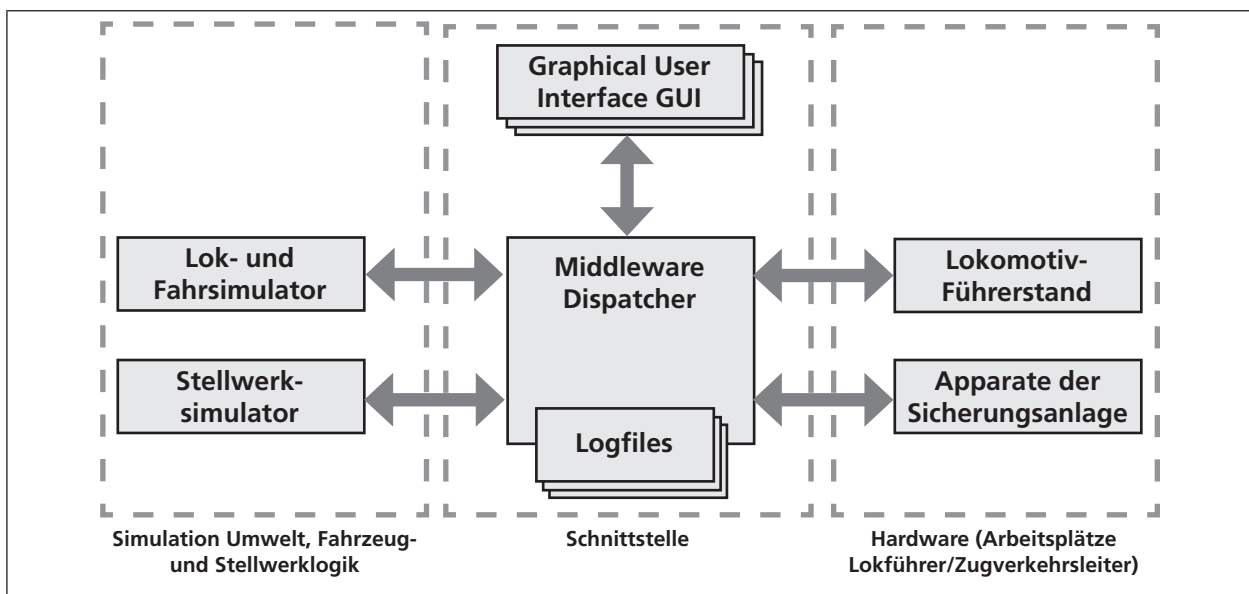


Abbildung 32: Funktionsprinzip der Middleware „Dispatcher“ für die Integration von Fahr- und Stellwerksimulatoren (Quelle: RIESEN 2012: 29, abgeändert)

Der Dispatcher passt Sensor- und Aktorereignisse der Simulation, respektive dem Führerstand und der Sicherungsanlage (Stellwerk) an und leitet sie weiter. Das Graphical User Interface (GUI) zeigt den aktuellen Status der Hardware (Führerstand und Stellwerk). Man kann die Simulation auch direkt über das GUI steuern. (RIESEN: 29) Der Dispatcher bildet eine wichtige Grundlage für die Entwicklung eines integrierten Simulationsmodells, bei welchem sowohl Lokführer als auch Zugverkehrsleiter mit einbezogen werden. Mit einem solchen Modell kann ein grösserer Teil des Wirkungsgefüges der Tätigkeiten von Lokführer und Zugverkehrsleiter dargestellt werden, um komplexe Problemstellungen zum Beispiel aus Ereignissen und Unfällen zu verstehen. Eine besondere Herausforderung stellt die Modellierung der Stellwerklogik dar, für welche im Gegensatz zu dem im Abschnitt 4.5.1 beschriebenen Datenformat railML noch kaum Standardisierungen bekannt sind.

4.2.1 Entwicklung einer neuen Middleware

Für die Verbindung von Stellwerkmodell und bestehenden Fahrsimulatoren ist eine flexible Lösung mit modulartigem Aufbau anzustreben. Damit wird das Ziel verfolgt, die entwickelten Schnittstel-

len und Programme für die Integration der Simulatoren möglichst vielseitig anzuwenden. Es soll möglich sein, nach Bedarf auch andere Simulationsprogramme für Triebfahrzeuge und Stellwerk anzuschliessen und damit in das Modell zu integrieren.

Für die Verbindung von Fahrsimulator und Stellwerk ist eine Middleware zu entwickeln, welche durch eine Implementierung, basierend auf der Programmiersprache Java unabhängig von Betriebssystemen ist. Sie muss standardisierte Schnittstellen über RS 232 unterstützen können und zu Schnittstellen von Fremdsystemen kompatibel sein. Schliesslich ist eine modulare Architektur erforderlich, welche parallele Implementierungen, Testfälle auf Layerebene, gute Voraussetzungen für die Wartung und Weiterentwicklung und eine schnelle Einarbeitungszeit in die Module erlaubt. (STRAUBE, schriftliche Mitteilung vom 03.02.1214) In Abbildung 33 ist das Funktionsprinzip der ersten Version dieser Middleware dargestellt.

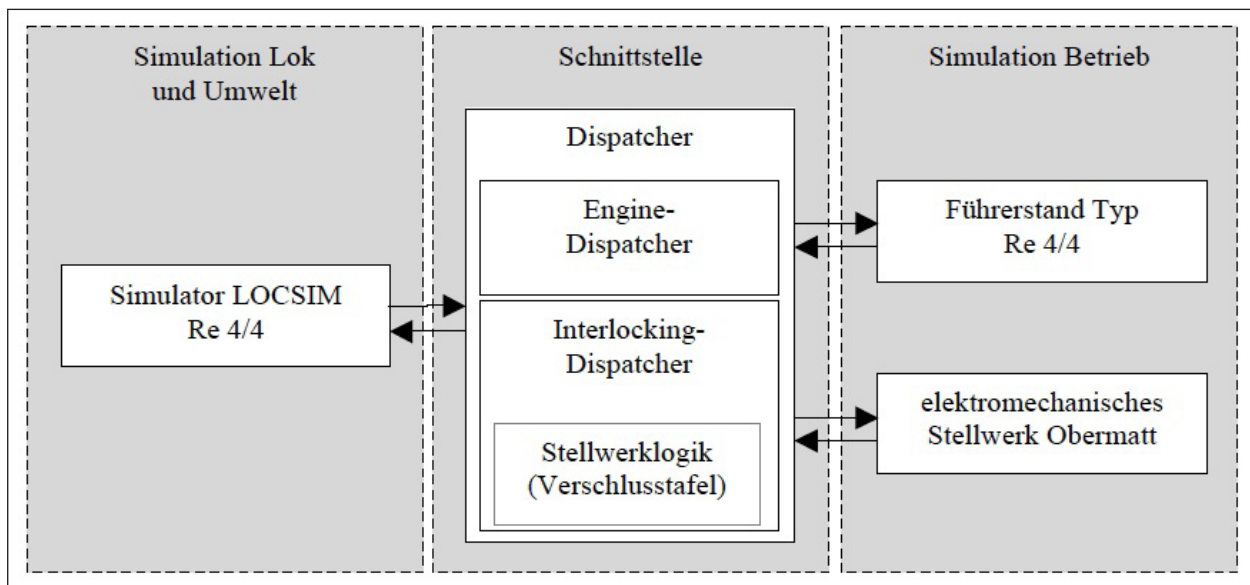


Abbildung 33: Verbindung von Simulator und Hardware sowie Integration der Stellwerklogik in den dynamischen Fahrsimulator LOCSIM mittels Middleware. (SUTER/STRAUBE/RIESEN, 2012: 170)

4.2.2 Integration der Stellwerke

Im Sinne der in Abschnitt 4.1 vorgestellten Lösungsstrategie wurde für die Integration von Fahr- und Stellwerksimulatoren die Middleware „Dispatcher“ entwickelt. Es handelt sich dabei um eine Software, welche bestehende Simulationsprogramme so verbindet, dass sie Informationen austauschen können. Dabei müssen die Informationen in Form von Protokollen von den Bedienelementen der Hardware (Stellwerke oder Führerstände) über eine Schnittstelle in den Dispatcher gelangen und in das entsprechende Simulationsprogramm weitergeleitet werden können. Umgekehrt werden von dort andere Informationen zurück über Dispatcher und Schnittstelle an die Anzeigeelemente der Hardware ausgegeben. Für die Entwicklung dieser Middleware waren insbesondere vier technische und konzeptionelle Hürden zu überwinden, welche an Stelle der Verwendung von standardisierten Programmen eine Neuentwicklung erforderlich machten:

- Die Software der Simulationsprogramme ist proprietär und kann daher aus rechtlichen und technischen Gründen nicht einfach eingesehen werden. Dies führt dazu, dass es für die einzelnen Ereignisse, die über die zu entwickelnde Schnittstelle kommuniziert werden sollen, keine Standardformate gibt. Die Formate der Ereignisprotokolle hängen vom Entwickler der Simulationsprogramme ab,

- Die Simulationsprogramme sind nicht offen gestaltet, sondern sind als eigenständige Systeme konzipiert und ausgeführt, zu welchen keine oder nur in sehr beschränktem Umfang Schnittstellen vorgesehen sind. Die Anbindung an neue Schnittstellen beruht stets auf gegenseitigem Einverständnis und ist mit Entwicklungsaufwand verbunden,
- Die zu integrierenden Systeme sind bezüglich Schnittstellen und Anbindung an Umsysteme in der Regel unzureichend oder nicht dokumentiert,
- Die Simulatoren sind als „single-box“ konstruiert, da bisher keine Spezifikationen für Schnittstellen für die Anbindung von anderen Programmen verlangt wurden.

Der Dispatcher beruht auf einem event-basierten Lösungskonzept. Dabei wird der Zustand der Umgebung nur bei der Initialisierung erfasst, die übrigen Operationen erfolgen auf der Basis von Ereignissen, die im Verlauf der Simulationen auftreten. Es wurde die Anforderung gestellt, dass nach einem Bedienungsvorgang an der Hardware die Reaktion in einer Zeit zwischen 10 und 100 ms erfolgen muss. Dieser Erfahrungswert ist mit einer möglichst realitätsnahen Abbildung des Simulationsmodells zu begründen und bildet mit ein Grund für die Wahl des event-basierten Lösungskonzepts.

Ferner ist die örtliche Unabhängigkeit des Middleware wünschenswert. Demnach muss es möglich sein, die Middleware in einer verteilten Anordnung laufen zu lassen, indem die Informationen über Protokolle gesendet werden. Zudem besteht die technische Anforderung, dass der Dispatcher nicht nur aus einer reinen Mapping-Tabelle besteht, sondern auch noch logische Elemente enthalten kann, welche in den Simulationsprogrammen für die korrekte Anwendung auf den Anzeigeelementen der Hardware nicht vorgesehen ist. Diese Eigenschaft wurde vor allem auf Grund typenspezifischer und funktioneller Unterschiede zwischen Ländern, Bauarten, Unternehmungen usw. gefordert. So zum Beispiel muss ein Teil der Logik für die korrekte Abbildung der Anzeigen für die Schweizer Zugsicherung mit einem deutschen Simulationsprogramm vom Dispatcher übernommen werden. (RIESEN, mündliche Stellungnahme am 16.01.2014) Eine Integration von Stellwerken und Fahrsimulatoren wurde bisher zu technischen Forschungszwecken im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR umgesetzt.

Für die Verbindung von Hardware (Lokführerstand, Stellwerk) mit dem Simulator und der Stellwerklogik (s. Abbildung 33) wurden geeignete Controller evaluiert und zusammen mit neu erstellten Schnittstellen eingebaut. Die Verbindung von Führerstand und Simulationsprogramm (LOCSIM) konnte erfolgreich umgesetzt und getestet werden. Für die Integration des Stellwerks müssen zwischen Middleware und Simulationsprogramm die Informationen gemäss Tabelle 9 ausgetauscht werden.

von Simulator zu Middleware	von Middleware zu Simulator
momentaner Standort der ersten Achse	momentaner Zustand der Signale
Distanz bis zur letzten Achse	momentane Stellung der Weichen
Optional: momentaner Standort aller Achsen	Zustand weiterer Einrichtungen (Licht, Fahrleitung usw.)

SUTER 2013

Tabelle 9: Informationsaustausch zwischen Simulationsprogramm und Middleware für die Modellierung Integration der Stellwerklogik.

Nach den Versuchen mit dem in Visual Basic geschriebenen Dispatcher wird die Middleware auf der Basis der Programmiersprache Java weiter entwickelt, um die Verbindung von Stellwerk und Fahrsimulator zu realisieren. Dazu müssen folgende Hürden überwunden werden: (STRAUBE, schriftliche Mitteilung am 03.02.2014)

- Definition eines Standardformats für die maschinelle Lesbarkeit der Stellwerklogik,
- Validierung einer aufgenommenen Stellwerklogik (Schnittstelle Mensch-Maschine),
- Testfälle (positiv/negativ) zur Verifizierung der korrekten Funktionen,
- Abstrakte Implementierung, um gemeinsame Eigenschaften von verschiedenen Stellwerktypen auf einfache Weise zu implementieren.

Für die Modellierung der Stellwerklogik wird eine Rule-Engine zur Anwendung gebracht, welche auf einer Funktionsmatrix basiert, die ihrerseits aus der Verschlussstabelle des Stellwerks hervorgeht. Diese Funktionsmatrix ist stellwerkspezifisch aufgebaut und zeigt die Beziehungen aller Vorgänge und Zustände, die am Stellwerk vorkommen können. Dieses ablauforientierte Beschreibungsmittel bildet die Grundlage für die Gestaltung der Rule-Engine, welche als Schicht zwischen Middleware und Hardware (Stellwerk) angeordnet ist. Die Funktionsmatrix des Versuchsstellwerks Obermatt ist im Anhang ersichtlich.

4.3 Einrichtungen des Forschungslabors

Für das Testen der in der Theorie entwickelten Ansätze und Hypothesen wurde im Bernapark, der ehemaligen Karton Deisswil AG ein eigenes Forschungslabor mit mehreren ausgewählten Lokführerständen, Stellwerken und Signalen, einem Theorie- und Präsentationsraum und einer kleinen Werkstätte eingerichtet. In diesem Labor ist auch der in der Schweiz zur Zeit einzige Vollsimulator einer Lokomotive vom Typ Re 460 aufgebaut, welcher - wie oben erwähnt - von den SBB übernommen wurde. Zwei weitere Führerkabinen von Originallokomotiven der Typen Re 4/4 II und Ae 6/6 dienen für Untersuchungen über die Anbindung von Hardware an Fahrsimulationsprogramme sowie über die Visualisierung der Landschaft. Ferner konnten fünf genau identische Standard-Führerstände von Triebwagen des Typs RBe 540 übernommen werden, welche ebenfalls in das Simulationsmodell integriert werden sollen.

Die Modellierung mit verschiedenen Instrumenten stützt sich auf die Teststrecke rund um die Signalstation Obermatt im Emmental, auf welche im Abschnitt 4.10 näher eingegangen wird. Als Grundlage für die Stellwerkmodellierung wurde das elektromechanische Stellwerk, welches von 1953 bis 1989 in Betrieb war, aus Originalteilen des ausgedienten Stellwerks von Suhr AG nachgebaut (vgl. Abbildung 34).



Abbildung 34: Einbau des Mikrocontrollers mit Optokoppler in das elektromechanische Stellwerk Obermatt durch DESM-Techniker im Forschungslabor.

Für das Relaisstellwerk vom Typ Domino 69, mit welchem der Zugverkehr zwischen 1989 und 2004 geregelt und gesichert wurde, konnten die notwendigen Bauteile bei den SBB aus ausgedienten Apparaten beschafft werden. Für die Modellierung des mechanischen Stellwerks vom Typ Bruchsal G, welches im Jahr 1933 eingebaut wurde (WÄGLI, schriftliche Stellungnahme vom 04.07.2011) und bis 1953 diente, konnte das Vierkurbelwerk der ehemaligen Sicherungsanlage von Lommiswil SO verwendet werden. Schliesslich wurde das mechanische Stellwerk des tschechischen Bahnhofs von Červený Kostelec übernommen, welches Untersuchungen an mechanischen Anlagen ermöglicht, nachdem die entsprechenden Stellwerktypen in der Schweiz bereits seit einiger Zeit verschwunden sind.

Die Tabelle 10 zeigt die Instrumente, Forschungsfragen und Teilprojekte im Forschungslabor. Die darin vorgesehenen Untersuchungen gestalten sich derart aufwändig, dass die Ressourcen für diese Arbeit nicht ausreichen würden. Es ist gelungen, mit vielen Fachpersonen und Institutionen zusammenzuarbeiten. Aus dem DESM-Forschungslabor wurde Anfang Jahr 2013 der Verein DESM.ch gegründet, welcher sich der Weiterentwicklung des Labors im Anschluss an diese Arbeit annimmt.

Nr.	Instrument	Forschungsfragen	erwartete Ergebnisse
3.8.1	Vollsimulator Re 460 (FASI)	Fallstudien mit freiwilligen Lokführern.	Erkenntnisse über die Anforderungen für die Anwendung von Simulatoren im Bereich der Forschung.
		Anbindung des Simulators an die DESM-Middleware	Erkenntnisse über die Integration in das Gesamtsystem Fahrsimulator/Stellwerke.
3.8.2	Führerstand Re 4/4	Entwicklung einer Middleware für die Anbindung verschiedener Fahrsimulatoren und Stellwerke.	Erkenntnisse über Anforderungen und Machbarkeit der Entwicklung.
		Untersuchung der Schnittstelle zwischen Middleware und Hardware am Beispiel der Applikation ZUSI 3.	Erkenntnisse über eine mögliche Standardisierung einer Middleware.
		Experimente mit grossflächiger Projektion der Landschaft zwecks idealer räumlicher Darstellung	Erkenntnisse über die Bedeutung und Umsetzung der Visualisierung der Landschaft bei Fahrsimulatoren.
3.8.3	Führerstand Ae 6/6	Untersuchung und Standardisierung der Schnittstelle zwischen Middleware und Hardware am Beispiel der Applikation ZUSI 3.	Erkenntnisse über eine mögliche Standardisierung einer Middleware.
		Aufbau eines Simulators eines älteren Fahrzeugtyps mit tiefem Automatisierungsgrad (Fahrerassistenzsysteme) für Untersuchungen an der Schnittstelle Mensch-Maschine.	Erkenntnisse über die Einwirkung der Automatisierung auf die Fachkompetenz („Fahrgefühl“) der Lokführer.
3.8.4	Führerstände RBe 540	Aufbau von fünf identischen Führerständen als Simulator zwecks Sensitivitätsanalysen.	Erkenntnisse über den Nutzen eines Simulators für die gleichzeitige Untersuchung mehrerer Probanden.
		Mehrzugbetrieb mit ZUSI 3 mit fünf identischen Simulatoren und integrierter Betriebszentrale.	Erkenntnisse über die erweiterte Realitätsnähe bei der Simulation für den Zugverkehrsleiter.

3.8.5	Stellwerke Obermatt (drei Generationen)	Anbindung des Stellwerks an die Fahrsimulatoren.	Grundlegende Erkenntnisse über die Integration Stellwerk-Fahrsimulator.
		Entwicklung einer Schnittstelle Hardware - Middleware und Modellierung der Stellwerklogik.	Beitrag zum Aufbau von Standards bei der Modellierung von Stellwerklogik.
		Untersuchung im Zeitintervall: Anbindung mehrerer Stellwerktypen bzw. Generationen der gleichen Station für Untersuchungen an der Schnittstelle Mensch-Maschine.	Erkenntnisse über die Einwirkung der Automatisierung auf die Fachkompetenz bezüglich Orts- und Systemkenntnisse der Zugverkehrsleiter.
3.8.6	Stellwerk Cervený Kostelec	Aufbau eines Simulators eines mechanischen Stellwerks für Sensitivitätsanalysen vor dem Hintergrund der Automatisierung.	

SUTER 2014

Tabelle 10: Übersicht über die im Forschungslabor angewandten Instrumente mit ihrem Zweck und den erwarteten Ergebnissen.

Als Plattform für die Kommunikation dient die eigene Homepage <http://www.desm.ch>, in welcher sowohl die Problemstellung der vorliegenden Arbeit als auch das Forschungslabor eingehend vorgestellt wird. Über die Homepage können einzelne Sachverhalte veranschaulicht und Dokumente gezielt oder öffentlich zugänglich gemacht werden. Auf der Homepage wird laufend über die Fortschritte der Arbeiten und die Aktivitäten berichtet.

Während dem Verlauf der praktischen Untersuchungen im Labor fanden zahlreiche Vorführungen und Präsentationen an Fachleute, sowie im November 2013 ein öffentlicher Besuchstag statt. Eine Publikation zu Beginn des praktischen Teils in einer Eisenbahnfachzeitschrift verschaffte dem Projekt mehr Bekanntheit und führte zu neuen Mitgliedern im Verein DESM. (SUTER 2012: 265) Für das 9th Symposium on Formal Methods for Automation and Safety in Railway and Automotive Systems FORMS/FORMAT, stattgefunden im Dezember 2012 in Braunschweig, wurde der Aufsatz „Modelling a universal rail system with a focus on interrelationships“ eingereicht, vorgetragen und publiziert. (SUTER/STRAUBE/RIESEN 2012: 164-173)

4.4 Videobasierte Datenerhebung

Das Erheben und Verwalten von Daten über das Eisenbahnsystem ist primär Aufgabe der Transportunternehmungen. Mit dem im vorangehenden Abschnitt beschriebenen Ansatz „railML“ für eine Vereinheitlichung eisenbahnspezifischer Formate wurde eine wichtige Grundlage für einen einfachen Datenaustausch geschaffen. Die in diesem Zusammenhang erwähnten Instrumente für das Erheben von Daten sind sehr vielfältig. In diesem Abschnitt geht es darum, einen neuen Ansatz vorzustellen, welcher auch den Prozess der Datenerhebung vereinfachen soll. Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie für die Entwicklung eines neuen Risikobewertungsinstruments durch das schweizerische Bundesamt für Verkehr (BAV) wurde durch den Ingenieurwissenschaftler Stefan WEGELE der Technischen Universität Braunschweig, Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik (IVA) ein neues Instrument entwickelt, welches eine videobasierte Erfassung von Daten einer Eisenbahninfrastruktur auf effiziente und schnelle Weise erlaubt. Das Grundprinzip wird in Abbildung 35 schematisch erklärt.

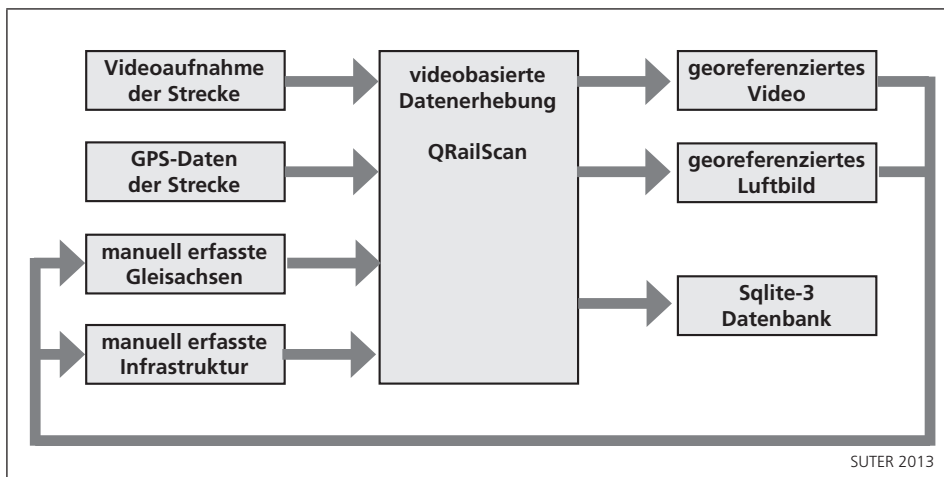


Abbildung 35:
Übersicht über das
Funktionsprinzip des
videobasierten Da-
tenerhebungsinstru-
ments QRailScan.

4.4.1 Funktionsweise von QRailScan

Das Instrument QRailScan wurde so konzipiert, dass die Videoaufnahme einer Strecke mit den gleichzeitig aufgezeichneten GPS-Daten versehen wird. Auf dieser Basis kann mit QRailScan auf einfache Weise durch die Strecke navigiert werden. Dabei wird auf der Benutzeroberfläche eine Referenzmarke sowohl auf dem Video der Strecke als auch auf dem Luftbild visualisiert. Mit Hilfe dieser beiden Bilder können sowohl die Gleisachsen als auch beliebige sichtbare Objekte der Infrastruktur (z.B. Signale, Bahnübergänge, Fahrbahn, Bauwerke usw.) genügend genau lokalisiert und erfasst werden. Dies geschieht, indem die Referenzmarke beim Objekt platziert und das Objekt mit wenigen Mausklicks erfasst und zugeordnet wird. Die Gleisachsen können sogar mit laufendem Video erhoben und später so weit wie nötig korrigiert werden.

Abbildung 36 zeigt die Gleisanlage des Bahnhofs Ramsei auf der Linie Burgdorf - Langnau, die mittels QRailScan erfasst wurde. Die Gleise können auch während der Wiedergabe des Videos erfasst werden. Für die Erfassung ist eine genügende Anzahl von Punkten möglichst in die Gleismitte zu setzen. Falsch gesetzte Punkte können später korrigiert werden. Die auf dem Weg liegenden Trackknoten (Weichen) sind dabei ebenfalls zu erfassen. Während dem Erfassen wird der neu erfasste Track zusammen mit dessen Punkten grün dargestellt. Die erfassten Tracks können markiert werden (Der Track und die Punkte werden nun rot dargestellt). Die Punkte des Tracks sind nun nötigenfalls in die Gleismitte zu verlegen oder/und auf der Gleisachse zu verschieben, bis die gewünschte Genauigkeit des Tracks erreicht ist. Die Kurvenradien werden durch QRailScan automatisch berechnet. Diese können ebenfalls später noch angepasst werden.

Diese Vorgehensweise erlaubt die Minimierung des Aufwands bei der Datenerfassung: Die benötigte Genauigkeit der Daten hängt vom Verwendungszweck ab. Daniel HÜRLIMANN (mündliche Stellungnahme vom 28.01.2014) erklärt am Beispiel vom Simulationsprogramm OpenTrack, dass für solche Anwendungen keine vermessungsgenauen sondern metergenaue Daten (Genauigkeit von +/- einem Meter) benötigt werden. Somit kann mit QRailScan der Aufwand der späteren Verwendung der Daten angepasst werden. Die manuell eingegebenen Gleispunkte und die daraus per Optimierungsverfahren berechneten Krümmungen werden binär als Binary Large Object (BLOB) in der Tabelle Track gespeichert und können direkt nur mit der C++ Klassenbibliothek QT ausgelesen werden. Dies wurde aus Gründen der Leistung (Performance) so ausgeführt. Der Gleisverlauf kann jedoch durch [...] das Erfassungstool exportiert werden. (WEGELE 2011: 1)



Abbildung 36: Gleisanlage des Bahnhofs Ramsey auf der Linie Burgdorf - Langnau. (Quelle: WEGELE, 2011: 4-5)

Die Abbildung 37 zeigt am Beispiel des Einfahrsvorsignals des Bahnhofs Malters auf der Strecke Bern - Entlebuch - Luzern, wie mit dem Instrument QRailScan die Infrastrukturobjekte auf der Basis von Video- und GPS-Aufnahmen erfasst werden können. Die Aufsicht im Luftbild kann mit dem Mausekranz schnell und einfach vergrößert/verkleinert werden, was die schnelle Verortung von Objekten auf der Strecke unterstützt. Für die Navigation durch die Strecke kann die Geschwindigkeit des Videobildes beliebig verändert werden. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt können die Infrastrukturobjekte nur nach dem oben beschriebenen Verfahren erfasst werden, indem die Referenzmarke mit Hilfe des Videobildes und dem Geländegrundriss im Luftbild manuell zum entsprechenden Objekt geführt wird. Eine automatische Detektion von Objekten wie Signale würde das Erhebungsverfahren von Infrastrukturdaten nochmals erheblich vereinfachen, sofern sie zuverlässig funktioniert.

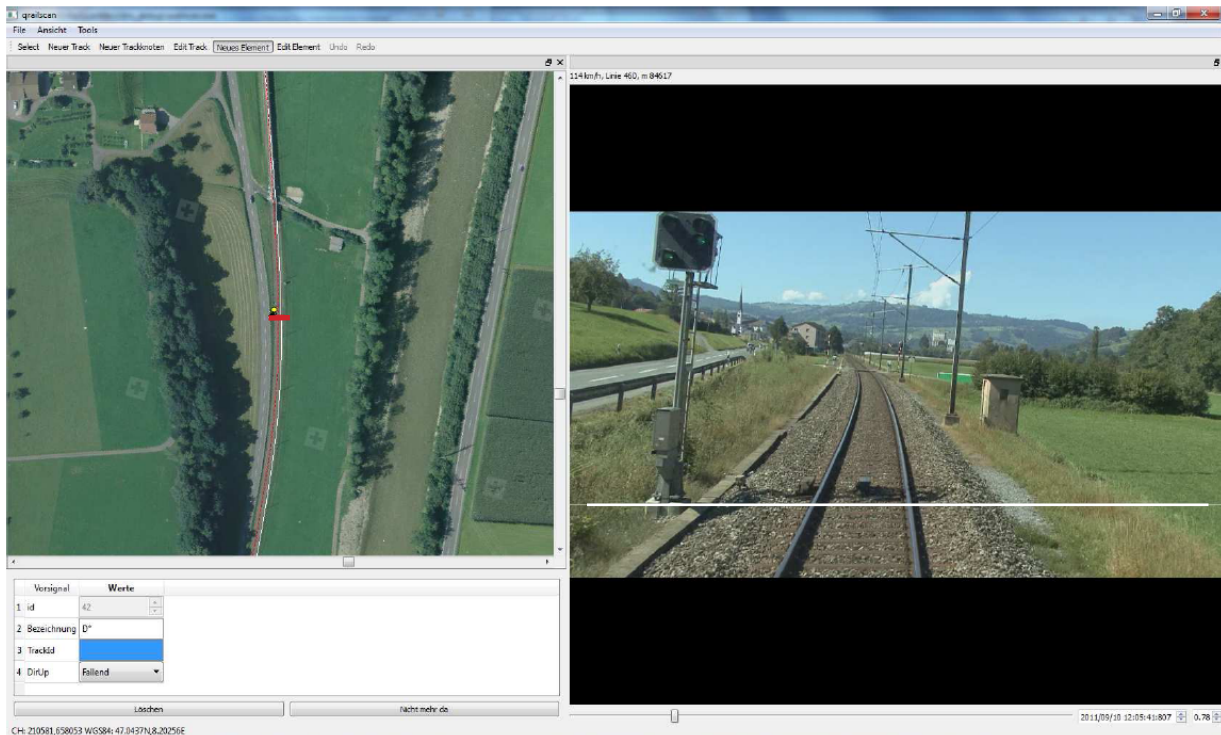


Abbildung 37: Die Bedienungs Oberfläche von QRailScan besteht aus drei Hauptbereichen: Rechts ist das Videobild mit dem aktuellen Standort auf der Streckenachse (Referenzmarke: weisse Linie) zu sehen. Links oben befindet sich der Grundriss mittels Satelliten-/Luftbild und dem aktuellen Standort (Referenzmarke: roter Balken) und den Gleis- und Objekteditoren. Links unten das Fenster für die Bezeichnung der erfassten Gleise/Objekte. (Quelle: WEGELE, 2011: 3)

4.4.2 Mögliche Weiterentwicklung mit Photogrammetrie

Vor diesem Hintergrund hat sich Roman SALZGEBER (2013: 5ff) im Rahmen seiner Bachelorarbeit an der Professur für Photogrammetrie und Fernerkundung an der ETHZ mit dieser Thematik befasst und eine Methode für die Detektion von Hauptsignalen in Videos entwickelt. Der Vorgang für die Signaldetektion kann grundsätzlich in drei Hauptteile gegliedert werden:

1. Verwendung eines Merkmaldetektors, mit welchem die Signale in den einzelnen Bildern erkannt werden können,
2. Kontrolle, dass es sich bei den verschiedenen Detektionen um das gleiche Signal handelt durch Vergleich der Bildfolge,
3. Bildung einer Detektionskette aus einzelnen Bildern über die gesamte Sichtbarkeit des Signals hinweg.

Mit dem auf Matlab (MatWorks) basierenden Programm vbbLabeler werden die Signale in den Bildern markiert. Vorbereitungen, wie Datenstrukturierungen und Datentransformationen für die Merkmaldetektion, erfolgen auf Matlab, auch um die Kompatibilität der Daten sicher zu stellen. Die eigentlichen Arbeitsschritte für die Signaldetektion sind in Abbildung 38 dargestellt. Da alle Arbeitsschritte bildweise durchgeführt werden, muss das Bildmaterial der Strecke in Einzelbilder zerlegt werden. Die Signalannotation besteht aus einer manuellen Markierung von Signalen, welche später für die Signalsuche als Vorlage benutzt wird.

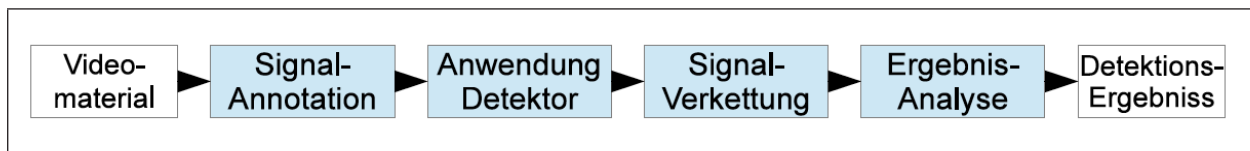


Abbildung 38: Übersicht über Arbeitsschritte für die Detektion von Haupt- und Vorsignalen in Videos. (Quelle: SALZGEBER: 2013: 7)

Der Detektor muss eine Menge annotierter Signale zur Verfügung haben, welche einen möglichst grossen Umfang von verschiedenen Sichtverhältnissen (Belichtung, Beleuchtung, Perspektive, Distanz usw.) enthält. Die Annotation dient als Grundlage für eine zuverlässige Funktion des Detektors. Mit diesen Annotationen wird anschliessend der Detektor getestet. In einem Trainingsprozess erlernt der Detektor die Merkmale, nach welchen gesucht wird, um die Signale zu erkennen. Anschliessend wird der Detektor mit einer Menge von Bildern getestet, wobei eine Abtastfrequenz definiert wird, damit der Detektor nicht die gesamte Menge der Bilder durchlaufen muss. Die Versuche von Roman Salzgeber haben ergeben, dass jedes zehnte Bild für eine genügend hohe Abtastfrequenz (= 2,5 Bilder/Sekunde) ausreicht, um zuverlässige Ergebnisse zu erhalten (vgl. Abbildung 39). Der Detektor liefert eine Datei, in welcher die Ergebnisse nach Bildern jeweils auf einer Zeile aufgeführt sind. Dabei sind die Bildkoordinaten und die Grösse des Signals im Bild (Breite, Höhe) gespeichert. Ein zusätzlich aufgeführter Konfidenzwert wird zur Überprüfung verwendet, ob es sich in der Bildfolge um das gleiche Signal handelt, welches detektiert wurde (Ähnlichkeit der Detektionen von Bild zu Bild).

Abbildung 39 zeigt im grossen Fenster das Bild, welches sich aktuell in Bearbeitung befindet. Die Signale sind in diesem Bild bereits annotiert. Im unteren Bereich des Fensters ist jedes n-te Bild der Bildreihe zu sehen. Auf diesen Bildern werden die Annotationen durchgeführt. Die dazwischen liegenden Bilder sind nicht sichtbar. Dort wird die Annotation automatisch durchgeführt. Die grün markierten Bilder sind annotiert. Der blaue Balken oberhalb der Bildreihe zeigt an, über welche Bilder die Annotation durchgeführt wird. Auf diese Weise können auch falsche Detektionen eliminiert werden. Die Detektionen werden in der Bildfolge miteinander verglichen, um sicherzustellen, dass es sich beim Ergebnis in jedem Bild um das gleiche Signal handelt. Wenn die Entfernung der Detektion von Bild zu Bild einen bestimmten Grenzwert (200 Pixel) überschreitet, sind die Detektionslücken zu lang (mehr als 10 Bilder) oder sind mehr als vier Signale detektiert, wird die Detektion verworfen.



Abbildung 39: Ausschnitt der grafischen Oberfläche dieses Annotationsprogramms am Beispiel der Ausfahrtsignale in Schüpfheim Richtung Luzern. (Quelle: SALZGEBER: 2013: 9)

Bei positivem Testergebnis werden die Bilder zu einer Detektions- oder Signalkette zusammengesetzt, womit nun das Signal über das Zeitintervall seiner Sichtbarkeit verfolgt werden kann. Diese Signalketten werden schliesslich noch visuell überprüft. Die ursprünglichen Daten pro Bild werden mit der Kettenbildung neu geordnet (Abbildung 40).

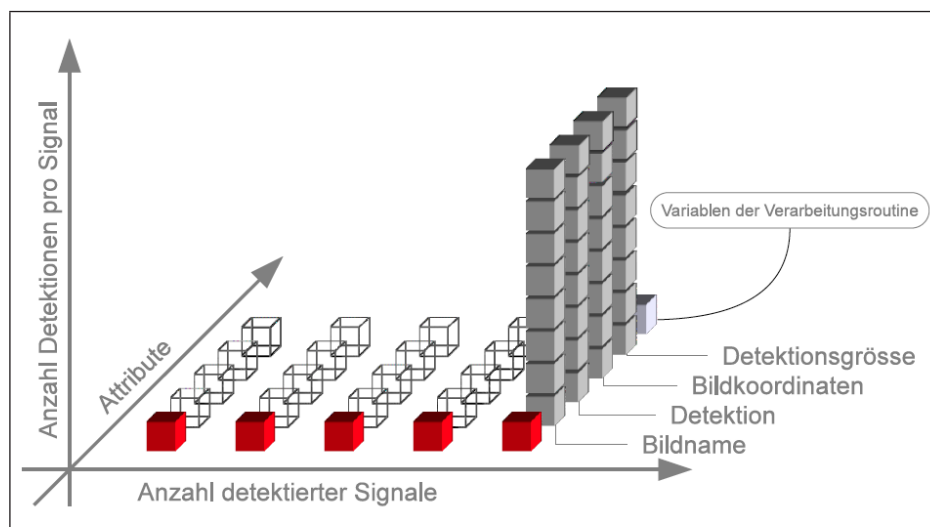


Abbildung 40:
Speicherstruktur
für Signalketten.
Übersicht über die
Detektions-Inforna-
tionen, Verarbeitungs-
variablen, sowie deren
Anordnung. (Quelle:
SALZGEBER: 2013:
17)

Mit seiner Arbeit hat Roman Salzgeber einen innovativen Ansatz für die Datenerhebung entwickelt. Die noch vorhandenen Fehler bei der Detektion von Signalen können im Kontext der gesamten erhobenen Daten weitgehend eliminiert werden, indem die detektierten Signale mit ihrer Funktion im Zusammenhang mit der Sicherungsanlage verglichen werden. Der Ansatz von Salzgeber stösst auch in Anbetracht des videobasierten Fahrsimulators LOCSIM, welcher unter Abschnitt 4.6.1 vorgestellt wird, auf Interesse.

4.4.3 Anwendung von QRailScan

Der erste der vier in Kapitel 1.7 aufgezeigten Arbeitsschritte für die Modellgestaltung besteht aus der Datenerhebung. Dabei wurde das im Jahr 2011 entwickelte und im Abschnitt 4.5.2 vorgestellte elektronische Instrument QRailScan verwendet. Damit wird der Nachweis erbracht, dass die videobasierte Datenerhebung für bestimmte Anwendungen, wie Eisenbahnfahr- und Stellwerksimulatoren, die effizienteste Methode darstellt. QRailScan basiert auf GPS- und Videoaufnahmen einer Strecke und erlaubt das Erfassen der für die Modellierung benötigter Daten über die Infrastruktur. Zu diesem Zweck wurde die Strecke Bern - Langnau - Entlebuch - Luzern (87 km) dreimal und die Strecke Burgdorf - Langnau (21 km) einmal gemäss den Angaben in Tabelle 11 mit Video aufgenommen.

Datum	Verfahren	Erkenntnisse
16.10.2009	DV Aufnahmen mit High-Speed Shutter (1/1000 Sek. pro Bild)	DV Aufnahmen qualitativ an der Grenze, einzelne Anschriften und Schilder auf Signalen können nicht gelesen werden.
10.09.2011	HD Aufnahmen mit High-Speed Shutter (1/1000 Sek. pro Bild)	HD Aufnahmen reichen aus, um alle benötigten Anschriften für die Datenerfassung zu lesen.
10.07.2013	HD Aufnahmen normal	HD Aufnahmen reichen nur in Verbindung mit sehr kurzen Verschlusszeiten pro Bild, um auch bei höheren Geschwindigkeiten benötigte Anschriften zu lesen.

SUTER 2013

Tabelle 11: Vergleich von drei verschiedenen Videoaufzeichnungen für das Instrument QRailScan auf der Strecke Bern - Langnau - Entlebuch - Luzern.

Die Versuche zeigen, dass die Verwendung sowohl von HD (high definition) Video als auch der Modus high speed shutter (verkürzte Verschlusszeit) mit 1/1000 Sekunden pro Bild benötigt wird, um beim späteren Betrachten der Aufnahmen die Lesbarkeit aller benötigter Anschriften auf Signalen auch bei höheren Geschwindigkeiten des Zuges sicher zu stellen. Als Beispiel sind an dieser Stelle die Hektometertafeln erwähnt, welche den aktuellen Standort relativ zum Referenzpunkt (Ausgangspunkt der Streckenkilometrierung) bezeichnen. Diese Informationen werden für die Synchronisierung der Videos und die Plausibilisierung bzw. Korrektur der GPS-Daten benötigt. Ferner werden für die Erfassung der Streckendaten auch die Angaben auf den Neigungszeigern benötigt, auf welchen die Steigungen oder Gefälle auf den entsprechenden Streckenabschnitten abgelesen werden können.

Die Abbildung 41 und 42 zeigen, dass in den Videoaufnahmen die Anschriften auf den Tafeln lesbar sind. Die Hektometer-Tafel zeigt die Entfernung von 58,4 km ab dem Kilometer-Nullpunkt der Strecke (roter Pfeil). Der Neigungszeiger zeigt Richtung Luzern (Abbildung 41) ein Gefälle von 20‰ auf 328 Meter und Richtung Bern (Abbildung 42) eine Steigung von 0,5‰ auf 153 Meter (gelber Pfeil). Die Streckengeschwindigkeit an dieser Stelle beträgt 90 km/h. Somit bewegt sich der Zug in der Videoaufnahme (25 Bilder/Sekunde) zwischen den Bildern um 1,3 Meter.

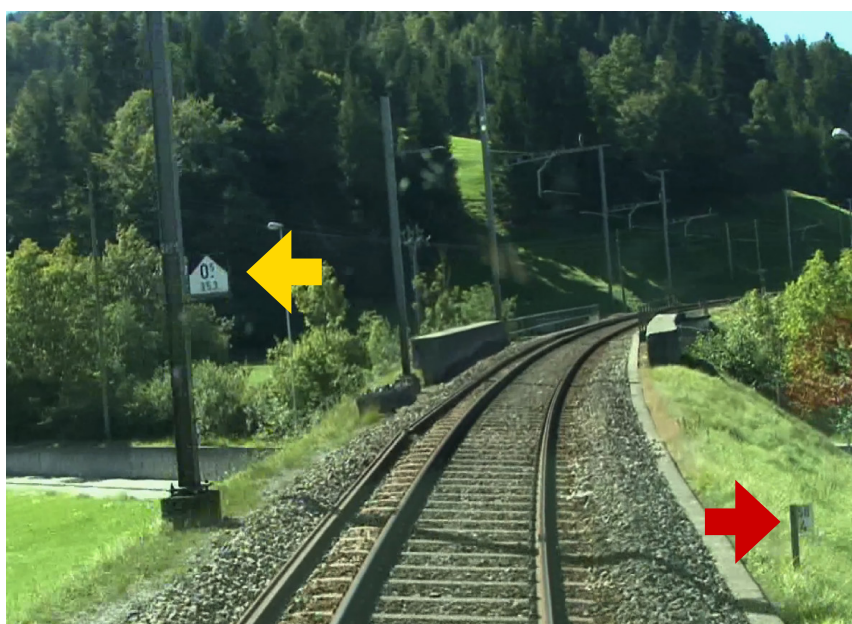
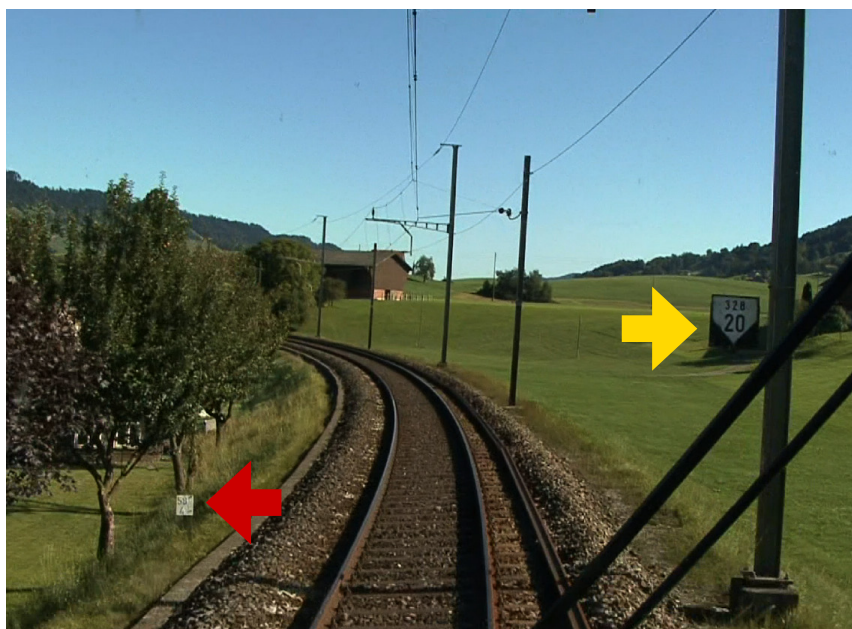


Abbildung 41 und 42: Die Aufnahme der Strecke auf der Hin- und Rückfahrt am gleichen Standort (zwischen Escholz matt und Schüpfheim) (SUTER, 10.09.2011)

Heute werden im Sport- und Outdoor-Bereich Miniaturkameras verwendet, welche den oben genannten Anforderungen gerecht werden und sich mit einem speziell für die Befestigung von Kameras konstruierten Saugnapf an der Frontscheibe der Lok verwenden lassen. Der GPS-logger kann mittels starker Magneten auf der Oberkante des Puffers der Lok befestigt werden, wobei die Distanz zur Kamera berücksichtigt werden muss. Mit dieser Konstellation können die für die Aufnahme erforderlichen Geräte einwandfrei funktionieren; der Aufwand für die Aufzeichnung der Strecke ist minimal.

Das Erfassen der Streckendaten erfolgt in drei Schritten: Erstens wird eine neue Messfahrt aufgesetzt, indem die Videoaufnahmen im benötigten Format (z.b. *mpeg4*) direkt im QRailScan indexiert und eingefügt werden. Falls die Kamera mit Zeilensprung aufnimmt, müssen die für die Verwendung mit QRailScan vorgesehenen Videodateien mit entflechteten Zeilen (Fachbegriff: *deinterlanced*) vorliegen, damit die einzelnen Bilder zusammengefügt in voller Auflösung betrachtet werden können. Die GPS-Aufnahmen werden als *csv-Datei* ebenfalls im QRailScan eingefügt. Schliesslich wird die zu Beginn der Videoaufnahme aufzunehmende Funkuhrzeit im QRailScan erfasst. Mit dem Datum und der Uhrzeit wird zusammen mit der Videolänge aus den GPS-Daten der richtige Ausschnitt extrahiert. In einem zweiten Schritt werden die Gleisachsen der entsprechenden Strecke erfasst. Dazu können direkt während der Wiedergabe Trackknoten gesetzt und abgespeichert werden. In Bahnhöfen, Anschlussgleisen usw. können zusätzliche Knoten gesetzt und verbunden werden. Die Trackknoten werden nachträglich mit Hilfe des Luftbildes korrigiert bzw. in die richtige Lage versetzt. Die Kurvenradien werden bei diesem Verfahren durch QRailScan automatisch berechnet. Wenn alle Gleisachsen erfasst sind, erfolgt der dritte Arbeitsschritt, bei dem die Infrastrukturobjekte einzeln zu erfassen sind. Zu diesem Zweck wird auf der Streckenaufnahme navigiert, bis sich die Referenzlinie genau auf der Höhe der zu erfassenden Objekte befindet. Die Erfassung erfolgt manuell mit dem dazu vorgesehenen Editor. (WEGELE, 2011: 3) SALZGEBER (2013: 21ff) hat in seiner Arbeit aufgezeigt, dass die Erfassung von gut sichtbaren Objekten wie Signale auch mittels Photogrammetrie automatisiert werden können. Da dieses Verfahren die Signale zwar mit hoher Zuverlässigkeit, jedoch nicht völlig fehlerfrei erfasst, muss mit einem geeigneten Verfahren die Evaluation der erfassten Objekte möglich sein. Dies könnte beispielsweise mit einer Logik geschehen, welche anhand von Funktionen und Konstellationen Unterschiede zwischen dem Soll und dem Ist der erfassten Signale feststellen kann. Stefan WEGELE (mündliche Stellungnahme vom 10.12.2013) gibt zu bedenken, dass QRailScan als Instrument für die Datenerfassung entwickelt wurde. Eine solche Funktion für die Plausibilisierung bzw. Evaluierung von erfassten Daten macht den Aufbau einer Logik erforderlich, welche nur mit sehr hohem Entwicklungsaufwand zu realisieren wäre. Er stellt weiter fest, dass die heute bestehende Möglichkeit einer manuellen Kontrolle in der Videoaufnahme mit bis zu dreifacher Geschwindigkeit eine günstige Alternative darstellt. Demnach kann angenommen werden, dass die Entwicklung einer solchen Logik in einem Missverhältnis zwischen Aufwand und Wirkung stehen würde.

Für die vorliegende Arbeit wurde QRailScan dazu verwendet, um die Infrastrukturdaten der in Abschnitt 4.10 vorgestellte Teststrecke zwischen Emmenmatt und Langnau sowie Zollbrück und Langnau mit der Abzweigstelle der Signalstation Obermatt zu erfassen. Aus Tabelle 12 geht hervor, dass der Aufwand für die Erfassung der Eisenbahninfrastruktur eines Streckenkilometers eine knappe Stunde beträgt. Dieser Aufwand erscheint auch vor dem Hintergrund einer allfälligen Aufbereitung von Daten von Infrastrukturunternehmen - sofern diese erhältlich sind - recht hoch. Es kann jedoch angenommen werden, dass der Erhebungsaufwand für diese Unternehmen auf Grund von Genauigkeit und Detaillierungsgrad wesentlich höher ausfällt. Diese Kosten müssten demnach bei der Verwendung solcher Quelldaten ebenfalls mit einbezogen werden.

Tätigkeit	Strecke	km*	Min.	Min./km
Videoaufnahme	Bern - Luzern	87	120	1,4
Videoaufbereitung Format mpeg.4	Bern - Luzern	87	120	1,4
GPS-Daten aufbereiten (csv-Datei)	Bern - Luzern	87	20	4,4
Messfahrt aufsetzen	Bern - Luzern	87	30	2,9
Gleisachsen erfassen	Emmenmatt - Langnau	4	120	30
Infrastrukturobjekte erfassen	Emmenmatt - Langnau	4	60	15
durchschnittlicher Aufwand für die Erfassung von Strecken in Min.				55,1
*bezieht sich auf die Streckenlänge. Parallel laufende Gleise (Doppelspur, Bahnhöfe) zählen nur einfach.				

SUTER 2014

Tabelle 12: Zusammenstellung der zeitlichen Aufwändungen für das Erfassen von Infrastrukturdaten mit dem Instrument QRailScan.

Die mit QRailScan erfassten Daten werden in einer *SQLite3-Datenbank* erfasst, in welcher SQL-Tabellen in nur einer Datei verwaltet werden. (WEGELE, 2011: 1) Mit diesen Daten können einfach Modelle wie z.B. ein Streckenprofil direkt erstellt werden. Für die Anwendung der Daten in bestehenden Instrumenten, wie z.B. Simulationsprogramme, müssen sie aufbereitet werden. Für die einfachere Anwendung bestehender Daten wurde das in Abschnitt 4.5.1 vorgestellte Format railML entwickelt.

4.5 Daten, Quellen

Am Anfang jeder Modellierung steht die Datenerhebung. Im Zeitalter elektronischer Hilfsmittel und scheinbar unbegrenzter Speichermedien liegen die grossen Herausforderungen, die es zu bewältigen gilt, nicht mehr bei der Beschaffung von sondern bei deren zweckmässigen Auswahl, deren Aufbereitung für ihre spätere Verwendung sowie deren Aktualisierung. Ein zentraler Aspekt der Modellierung besteht aus dem Massstab bzw. der Auflösung, in welcher das Modell aufgebaut werden soll. Dieser Frage wurde bei der Untersuchung der Anwendung von Simulationsmodellen nachgegangen. Auf Stufe Konzept für die Modellierung wird die Wahl des Modellmassstabs - abgesehen von Anforderungen hinsichtlich seiner Anwendung - vor allem auch durch den Aufwand und damit durch die Kosten bestimmt. In dieser Hinsicht erscheint es bei der Erhebung notwendig, dass Objektdaten nebst mit räumlichen, funktionalen, morphologischen, materiellen usw. auch mit zeitlichen Attributen versehen werden.

Mit der Feststellung, dass für die Datenerhebung und Datenbewirtschaftung viele Instrumente und Möglichkeiten bestehen, stellt sich die Frage nach der geeigneten Form, in welcher die Daten produziert werden sollen. Für den Betrieb des Eisenbahnnetzes in der Schweiz sind 62 Infrastrukturbetreiber ISB tätig (Stand 1. Januar 2011). (LITRA 2010: 1) Die Unternehmen bewirtschaften die Daten über ihre Infrastruktur, damit sie ihre gesetzmässige Verantwortung für den Bau, Betrieb und Unterhalt der Anlagen wahrnehmen können. Die Schweizerischen Bundesbahnen SBB haben dazu im Jahr 1989 damit begonnen, eine systematische elektronische Dokumentation ihrer gesamten Infrastruktur aufzubauen. Die sogenannte „Datenbank feste Anlagen“ DfA ist ein geografisches Informationssystem GIS und hat sich heute zu einer der wichtigsten Grundlagen für Planung und Betriebsführung entwickelt. Das SBB-Streckennetz mit einer Länge von ca. 3 000 km umfasst rund 7 000 km Gleise mit 16 000 Weichen, gegen 6 000 Brücken und über 8 000 Gebäude. Insgesamt sind in der DfA die Daten über Objektgruppen der Fachdienste Geomatik (Strecken-, Gleis- und Weichennetz), Fahrbahn, Trassenbau, Fahrstrom, Signalanlagen, Kabelanlagen, Architektur, Niederspannung, Weichen- und Zugvorheizung, Verträge mit Dritten und Telekommunikation verwaltet. (BELLOTTO: 2004: 724f)

Die wichtigste Referenz für die räumliche Zuordnung von Objekten besteht nebst der x-/y-Koordinaten aus der Streckenkilometrierung bzw. Bahnkilometrierung. Während dieses Referenzsystem auf allen Bahnstrecken angewendet wird, beteiligen sich bei der DfA nur wenige Infrastrukturbetreiber. Ausser der SBB-Infrastruktur betrifft dies die BLS Netz AG, die Südostbahn SOB, die THURBO sowie die Zentralbahn ZB. Dies entspricht einer gesamten Streckenlänge von 3 710 km und einem Anteil am gesamten Eisenbahnnetz der Schweiz (5 049 km) von 73,48%. (www.bfs.admin.ch, 29.11.2013) Demnach werden mehr als ein Viertel der Daten über das Streckennetz durch die übrigen 58 Infrastrukturunternehmen erhoben und verwaltet. Es liegt auf der Hand, dass diese Unternehmen den Datenhaushalt in einer Weise führen, dass sie primär ihre Anforderungen abdecken. Dies führt jedoch dazu, dass die Daten zwischen den verschiedenen Unternehmungen oft nicht kompatibel sind, was den Datenaustausch erschwert. Die Modellierung von Eisenbahnsystemen über die Grenzen einzelner Infrastrukturbetreiber hinweg kann grossen Aufwand verursachen, da die Daten zuerst in eine einheitliche Form überführt werden müssen.

4.5.1 Das Datenformat railML

Die Initiative railML beschäftigt sich seit rund zehn Jahren mit dem Datenaustausch für Eisenbahnanwendungen und hat zu diesem Zweck das einheitliche Format „railML“ geschaffen, welche auf XML-Schemata basiert. Daniel HÜRLIMANN (mündliche Stellungnahme am 28.01.2014), Entwickler des weltweit eingesetzten Simulationsinstruments OpenTrack schildert die Entstehungsgeschichte dieses Datenformats. Betriebliche Simulationen für die Planung von Eisenbahnprojekten erfordern eine hohe Zahl von Daten verschiedener Herkunft. Nachdem für die Entwicklung von OpenTrack vorerst mit Daten der SBB, die für die damalige Zuglaufrechnung ZLR bestimmt waren, gearbeitet werden konnte, machten sich die Entwickler bald Gedanken über eine Standardisierung der Formate. Angefangen hat dieses Projekt in einer Zusammenarbeit zwischen der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich ETHZ und den SBB. Aus dieser Initiative ist inzwischen ein internationales Netzwerk entstanden, welches sich aus Vertretern von Firmen der Eisenbahnindustrie, Transportunternehmungen, Hochschulen, Behörden und anderen Institutionen aus vielen Ländern Europas zusammensetzt.

4.5.2 Die railML Schemata

Die Entwicklung der railML-Schemata erfolgt in offener Weise und ist in Diskussionsrunden und Arbeitstagungen organisiert. Das strukturierte Vorgehen für die Entwicklung der Schemata ist in Abbildung 43 dargestellt. Es ermöglicht eine Kompatibilität von künftig zu generierenden Daten über das Eisenbahnsystem, vorausgesetzt, dass sich die entsprechenden Organisation an das railML-Schema halten. Die Diskussion der Problemstellungen und Lösungsansätze werden im eigenen Forum geführt. Die railML-Schemata werden durch die Verantwortlichen der Initiative aktualisiert auf der Homepage veröffentlicht.

railML ist als Standard zu verstehen, nach welchem Daten für eisenbahnspezifische Anwendungen formatiert werden sollen. Damit wird der Datenaustausch wesentlich vereinfacht oder überhaupt erst ermöglicht. Christian RAHMIG (schriftliche Stellungnahme vom 11.12.2013), railML Entwickler am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR, erklärt weitere grundsätzliche Vorteile des railML-Standards:

- Unabhängigkeit von Industrie oder marktbeherrschenden Firmen,
- freie Zugänglichkeit dank OpenSource,
- Anwender- und Entwickler-Community mit Forum, Wiki und TracTicket-System,
- Europäische Verbreitung (auch dank englischsprachigen Elementen)

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden unter anderem Überlegungen zu den Möglichkeiten angestellt, wie zeitliche Attribute in die railML-Schemata eingebracht werden könnten, damit die Modellierung der Daten im Zeitintervall möglich wären.

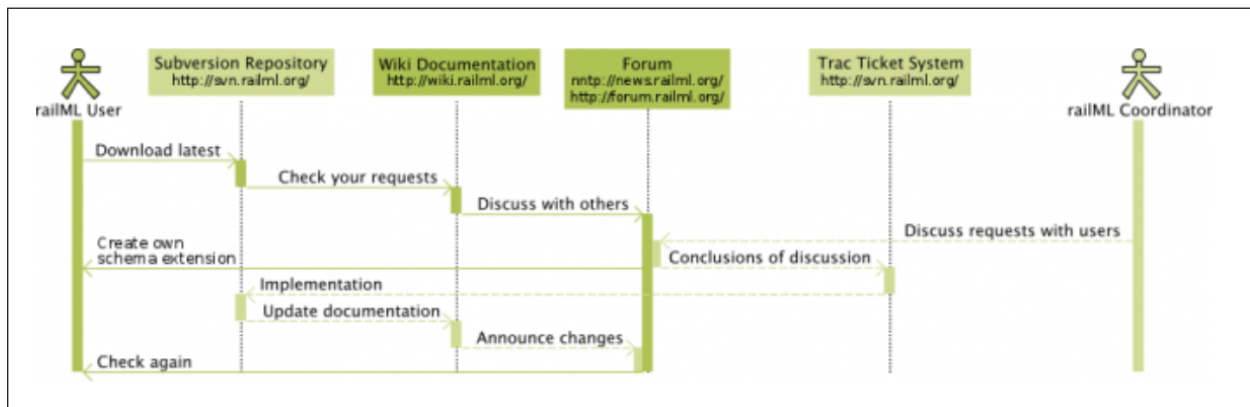


Abbildung 43: Der railML-Entwicklungsprozess zeigt das offene Konzept, nach welchem sich beliebige railML-Benutzer oder jede Institution frei in die Arbeit der Initiative einbringen können. (Quelle: www.railml.org, 29.11.2013)

Das railML-Schema besteht aus folgenden Subschemata:

- IS - Infrastructure
- TT - Timetable and Rostering
- RS - Rollingstock
- CO - Common
- IXL - Interlocking (in Entwicklung)

Folgendes Beispiel zeigt die Darstellung eines Blocksignals im railML-Format: (<https://trac.assembla.com>, 29.11.2013)

```
<signal id="s01" pos="42.0" type="main">
  <signalAspect id="s01a01" switchable="true" type="block">
  </signalAspect>
  <signalAspect id="s01a02" switchable="false" type="speed"
    elementRef="sc01">
  </signalAspect>
</signal>
```

Die Semantik `<signal>` definiert verschiedene Parameter eines Signals. Im Beispiel oben werden folgende Attribute angewendet: (<http://wiki.railml.org>, 29.11.2013)

- `id=` eindeutiger Identifikator für dieses Signal
- `pos=` Position des Elements relativ zum Nullpunkt der Strecke (Bahn-Km)
- `type=` Signaltyp optional (hier: Hauptsignal)

Die Semantik `</signalAspect>` definiert einen Signalbegriff. Dieser Aspekt kommt im Beispiel oben zwei mal mit folgenden Attributen vor:

- `id=` eindeutiger Identifikator zu diesem Element (Signalbegriff)
- `switchable=` Signalbegriff optional (wahr oder falsch)
- `type=` Signaltyp optional (hier: Blocksignal und Geschwindigkeitssignal)
- `elementRef=` eindeutiger Identifikator für dieses Element

4.5.3 Anwendung und Akzeptanz von railML

Das spezifische Format railML für den Austausch und die Anwendung von Daten über die Eisenbahninfrastruktur und den Betrieb hat sich bisher weit verbreitet. Auf der Homepage der initiative railML (<http://www.railml.org>) sind viele Transportunternehmen, Universitäten und Institute aus zahlreichen Ländern genannt, welche das Format railML für die Verwaltung von Daten im Eisenbahnwesen anwenden. Dies lässt darauf schliessen, dass es die Initiative railML geschafft hat, ihr Datenformat zum international anerkannten Standard zu bringen. Vor diesem Hintergrund bei der vorliegenden Arbeit ist es demzufolge sinnvoll, railML für die Datenerhebung und -verwaltung anzuwenden. Das im vorangehenden Abschnitt behandelte Erfassungsprogramm QRailScan kann grundsätzlich erweitert werden, womit die erfassten Daten über die Infrastruktur von Bahnstrecken im railML Format generiert werden. WEGELE (mündliche Stellungnahme vom 10.12.2013) gibt zu bedenken, dass mit QRailScan auch Objekte erfasst werden können, welche im railML-Schema nicht enthalten sind. Mann muss also festlegen, welche Objekte in welchem Format erfasst werden sollen. Auf der anderen Seite muss sicher gestellt werden, dass die Programme, in welche die entsprechenden Daten zu importieren sind, ebenfalls auf dem railML-Format basieren. Die Akzeptanz des Datenformats railML ist inzwischen so gross, dass sich auch der internationale Eisenbahnverband UIC damit befasst. Viele Eisenbahnunternehmen weltweit haben ihre Datenverwaltung auf railML umgestellt, was sich insofern äussert, dass bei der Ausschreibung von diesbezüglichen Projekten railML als Anforderung genannt wird. (HÜRLIMANN, mündliche Stellungnahme am 28.01.2014)

Im Hinblick auf die Gestaltung eines Eisenbahn-Systemmodells nach den im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Ansätzen ist festzustellen, dass keines der verwendeten Instrumente mit einer railML-Schnittstelle ausgerüstet ist. Am Beispiel des Simulationsprogramms ZUSI erklärt dessen Entwickler Carsten HÖLSCHER (mündliche Stellungnahme vom 12.12.2013) jedoch, dass für sein Programm bereits früher ein railML-Exporter entwickelt worden sei. Er erwähnt, dass die gemäss railML-Schema vorgesehenen Daten nicht ausreichen würden, um eine Strecke vollständig für die Anwendung mit ZUSI modellieren zu können. Diese Aussage zeigt, dass auch hier Überlegungen über die Verwendung von Daten in verschiedenen Formaten notwendig sind.

4.6 Die Fahrsimulatoren LOCSIM, FASI und ZUSI 3

Die Datenerhebung und Modellierung bilden die Basis von Loksimulatoren, welche die technischen und betrieblichen Prozesse der beteiligten Züge und Stellwerke nachbilden und den aktuellen Zustand der Eisenbahninfrastruktur sowie die Bewegungen der Züge im Gelände visualisieren. Für diese Arbeit wurden drei Systeme von Loksimulatoren ausgewählt, welche einerseits hinsichtlich ihrer Eignung für die Integration einer Betriebszentrale mit Stellwerken und andererseits hinsichtlich den Anforderungen an die Anwendungen untersucht werden sollen. Im Folgenden sind die theoretischen Grundlagen dieser drei Fahrsimulatoren kurz vorgestellt.

4.6.1 Der Fahrsimulator LOCSIM der Berner Fachhochschule

Der LOCSIM ist eine Entwicklung der Berner Fachhochschule (BFH) in Biel/Bienne, bei dem für die Streckendarstellung ein videobasierter Ansatz verwendet wird. Die Visualisierung der Strecke mittels Video kann mit relativ geringem Aufwand realisiert werden (vgl. Abbildung 44). Für den Einsatz im Fahrsimulator hingegen genügt die reine Videoaufnahme nicht, da sich die Visualisierung der Strecke an die möglichen Zustände der Infrastruktur (Fahrt auf verschiedenen Gleisen, Stellungen der Signale) in Echtzeit anpassen muss. Diese Anforderung haben die Forscher an der

Berner Fachhochschule auf die Weise gelöst, indem die Strecken über die für die Visualisierung gewünschten Gleise mehrmals aufgenommen werden und bei der Simulation als parallele Video-streams ablaufen, auf welche wahlweise zugegriffen werden kann. Somit ist es möglich, über verschiedene Gleise zu fahren, sofern sie im Simulator als Videostream vorhanden sind. Die im Video abgebildeten Lichtsignale werden mit einer bitmap-Grafik überdeckt, welche sich während der Simulation jederzeit den einzelnen Fahrbegriffen entsprechend verändern lässt. Mit diesem Ansatz hat die Berner Fachhochschule eine Streckendarstellung entwickelt, welche sich insgesamt mit weniger Aufwand und damit kostengünstiger modellieren lässt.



Abbildung 44: Der Fahr Simulator Locsim, verbunden mit einem Führerstand vom Typ Re 4/4 im DESM-Forschungslabor. (SUTER, 23.05.2012)

Für die Simulation von Fahrdynamik und Betriebsführung hat die BFH ein eigenes System entwickelt, welches eine grosse Zahl schweizerischer und ausländischer Triebfahrzeuge umfasst. Die Anbindung der Führerstände erfolgt über DLL-Schnittstellen. Dabei ist der Fachhochschule eine weitere Innovation gelungen. Das Simulationssystem erlaubt die einfache Anbindung eines Führerstandes über die Vielfachsteuerleitung, welche im Betrieb für die Fernsteuerung von Triebfahrzeugen in Doppeltraktion oder vom Steuerwagen aus verwendet wird. Diese Möglichkeit hat den Vorteil, dass Steuerwagen und Triebfahrzeuge während ihren Standzeiten als Simulator für die Ausbildung genutzt werden können. Der LOCSIM wurde von der BFH zur Anwendungsreife entwickelt und wird heute von Privatbahnen für die Aus- und Weiterbildung eingesetzt. Seitens RAILplus, der Plattform für unternehmerische Zusammenarbeit der Meterspurbahnen, wurde der Wunsch geäussert, unter Verwendung von LOCSIM auch integrierte Simulationen mit einer Betriebszentrale durchzuführen.

Für die vorliegende Arbeit wurde der LOCSIM für die Verwendung auf der Teststrecke Signau - Emmenmatt - Obermatt - Langnau zur Verfügung gestellt. Im Gegenzug wird im Forschungslabor ein neuer Ansatz entwickelt, welcher die Anbindung von Stellwerken erlaubt.

4.6.2 Der Fahr Simulator FASI der SBB Re 460

Im Jahre 1997 wurde im Ausbildungszentrum Löwenberg der Schweizerischen Bundesbahnen SBB ein Fahr Simulator der Lokomotive vom Typ Re 460 in Betrieb gesetzt. Der Simulator wurde in dem nach damaligem Stand der Technik höchst möglichem Detaillierungsgrad gebaut und in den nachfolgenden 14 Jahren intensiv zu Ausbildungszwecken eingesetzt. Eine abgeschlossene und vollständig ausgerüstete Führerkabine in Originalgrösse sowie ein Bewegungssystem sorgen für eine hohe Realitätsnähe. Der Instruktor verfügt über umfangreiche Instrumente für

die Steuerung und Überwachung von Simulationsübungen. Das System besteht aus insgesamt sechs verschiedenen Simulations-Rechnern zuzüglich Interbuscontroller, Bewegungssystemrechner und Synthesizer, welche durch Ethernet miteinander verbunden sind. (KRAUSS-MAFFEI WEGMANN, 2012: 1) Die einzelnen Rechner übernehmen die detaillierte Nachbildung aller Funktionen der Lok (Basissimulationsrechner), die Visualisierung des Geländes, die Steuerung des Bewegungssystems, die Nachbildung von Geräuschen, die Funktionen des Zugfunks und der Zugsicherung (Zugbeeinflussung), die Funktionen des Diagnosesystems der Lok, die Darstellung und Aufzeichnung der betrieblichen Daten (Fahrtschreiber) sowie die realitätsnahe Abbildung des Maschinenraums. Die Streckendarstellung erfolgt mittels 3D-Geländemodell, wozu ein Sichtsystemrechner verwendet wird. Das Konzept dieses Simulators sieht keine Integration von Elementen der Betriebsführung vor. Demnach sind die Prozesse für die Visualisierung der Infrastruktur und des Betriebs in keiner Weise mit einer Stellwerklogik verbunden. Die Übungen werden nach bestimmten Regeln im Voraus angelegt. Dabei können in grossem Umfang betriebliche und technische Situationen dargestellt werden. Signale und Fahrstrassen lassen sich auch während dem Betrieb einer programmierten Übung frei und in Echtzeit verändern. Die Funktionen dabei weisen jedoch mangels Stellwerklogik fast keine Abhängigkeiten auf, einzig die Vorsignale passen sich in der Regel an die Stellung der Hauptsignale an. Daher ist es leicht möglich, falsche Signalstellungen abzubilden. Die Gegenzüge folgen den Gleisen entsprechend den Weichenstellungen. Sie fahren normalerweise mit der vorprogrammierten konstanten Geschwindigkeit oder sie können ausgeblendet werden. Insgesamt jedoch kann diesem Fahrsimulator zugestanden werden, dass er für die Zeit seiner Entwicklung neue Massstäbe im Eisenbahnwesen gesetzt hat.

Mit der Beschaffung dieses Simulators ging auch die Eisenbahnreform einher, wobei die Ausbildungskonzepte an die neuen Rahmenbedingungen angepasst wurden, nach welchen die Lokführer ihren Dienst in der Regel nicht mehr gemischt im Personenverkehr und Güterverkehr, sondern getrennt nach Verkehrsart verrichteten. Auch der Einsatz der Lok Re 460 hat sich im Laufe ihrer Betriebszeit verändert: Nachdem sie ursprünglich Züge aller Gattungen zu befördern hatte, wird sie seit rund 10 Jahren nur noch im Personenverkehr eingesetzt. Der Simulator wurde aus Aufwandgründen nicht an die technische Entwicklung der Originalloks, der Originalinfrastruktur und der Regelwerke (Fahrdienstvorschriften) angepasst. Aus diesem Grund, zusammen mit Wirtschaftlichkeitsüberlegungen, hat die SBB im Jahre 2011 entschieden, den Simulator aufzugeben.

In der Folge konnte der Simulator für das Forschungslabor, welches für diese Arbeit aufgebaut wurde, übernommen werden, wo er als wertvolles Instrument zu Untersuchungszwecken eingesetzt wird (Abbildung 45 und 46). Er dient fortan für Versuche über die Notwendigkeit des Einsatzes von Simulatoren für die Untersuchung von komplexen Problemstellungen aus dem Eisenbahnbetrieb. Dabei können nicht nur Fragen über die Notwendigkeit einer maximal möglichen Auflösung von Simulationsmodellen im Hinblick auf konkrete Anwendungsbeispiele vertieft untersucht, sondern auch neue Erkenntnisse über die Wirkungszusammenhänge im System der Eisenbahnbetriebsführung im Sinne der in Kapitel 1 genannten Problematiken **A** bis **D** gewonnen werden. Im Rahmen dieser Arbeit und in Zusammenarbeiten mit Studierenden der Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW), Hochschule für Angewandte Psychologie wurden Fallstudien mit Lokführern durchgeführt, welche Erkenntnisse über die Anwendung von Simulationssmodellen, die Modellierung von Eisenbahnsystemen und die dazu notwendige Datenerhebung hervor gebracht haben, die in Kapitel 5 erklärt werden.

Der Fahrsimulator Re 460 FASI wurde rein für die Ausbildung von Lokführern und nicht für den Einsatz zu Forschungszwecken konzipiert. Daher wurde keine Möglichkeit für den Datenexport oder den Vergleich von Ergebnissen verschiedener Probanden vorgesehen. Der Fahrsimulator wurde im DESM-Labor nachträglich mit einer Schnittstelle ausgerüstet, um die erhobenen Daten für die Auswertung zu exportieren.



Abbildung 45 und 46: Der Fahr Simulator FASI im DESM-Forschungslabor nach der Übernahme von den Schweizerischen Bundesbahnen SBB. (SUTER, 22.12.2012 und 19.02.2013)

Der Fahr Simulator der Re 460 FASI zeichnet nach Start der Übung Daten über den momentanen Zustand des Triebfahrzeugs und der Anhängelast sowie über den aktuellen Standort mit einer Frequenz von 1 Hz auf. Ferner wird der Zustand der befahrenen Infrastrukturelemente registriert. Dies umfasst folgende Parameter:

- Sekunde nach Übungsstart [s];
- momentaner Standort der Zugspitze in Strecken-Km auf drei Stellen [kk.mmm];
- aktuelle Geschwindigkeit V IST [km/h];
- Stellung der gewählten SOLL-Geschwindigkeit [km/h];
- Wert der Beschleunigung [m/s^2];
- momentane Fahrleitungsspannung [V];
- momentane Leistung [W];
- Stellung des Fahrschalters [100% bis -100%];
- Stellung des Schalters für die automatische Bremse [0-8];
- Ansprechen der Zugsicherung „Warnung“ [1/0];
- Ansprechen der Zugsicherung „Halt“ [1/0];
- Ansprechen der Zugüberwachung ZUB „Warnung“ [1/0];
- Ansprechen der Zugüberwachung ZUB „Halt“ [1/0];
- Stellung der Permanentmagnetschienenbremse PMS [1/0];
- Zug- und Stosskräfte zwischen den einzelnen Wagen [N];
- momentaner Hauptleitungsdruck in den einzelnen Wagen [bar];
- momentaner Bremszylinderdruck in den einzelnen Wagen [bar].

Zudem werden Zeit (Sekunden nach Übungsstart), Ort (Strecken-Km und m) sowie Art und Zustand der befahrenen Signale und Sicherungsanlagen von Bahnübergängen registriert. Schliesslich werden die Abfahrts- und Ankunftszeiten an den Bahnhöfen und Betriebspunkten im Vergleich mit den SOLL-Zeiten (vordefinierte Fahrordnungen) festgehalten.

In der Tabelle 13 ist die Datenstruktur des FASI anhand eines Beispiels über einem Zeitintervall von 26 Sekunden dargestellt. Deutlich erkennbar ist die Datenaufzeichnung im Sekundentakt, welche in der ersten Spalte vom Zeitpunkt des Übungsstarts an fortlaufend nummeriert ist. In den folgenden Spalten sind die Position der Lokspitze auf der Strecke, die momentane Geschwindigkeit sowie die momentanen Zustände von Lok und Infrastruktur erkennbar. Das Sample kann nur mit Hilfe der Spaltenbezeichnungen interpretiert werden; es zeigt den Übergang von einer neutralen Beschleunigung zu einer Bremsung des Zuges: Die Geschwindigkeit des Zuges (zweite Spalte) nimmt ab Sekunde 551 von 125.0 km/h auf 105.5 km/h ab, währenddem der Geschwindigkeitsregler (dritte Spalte: V_Soll) auf 125 km/h eingestellt bleibt. Aus der praktisch neutralen Beschleunigung entwickelt sich bis zur Sekunde 568 eine Verzögerung von $0,649 \text{ m/s}^2$. Dies ist auch in der siebten Spalte anhand der elektrischen Bremsleistung von $6\,277,684 \text{ kW}$ nachvollziehbar. Der zu Beginn auf 89.473% Zugkraft eingestellte Fahrschalter befindet sich ab Sekunde 551 in der Stellung 99,534% elektrische Bremskraft. Die automatische Druckluftbremse wirkt ab Sekunde 566, indem der Hauptleitungsdruck von 5 bar für gelöste Bremsen auf 4,041 bar abgesenkt wird. Bei Sekunde 567 wird das Streckengerät der Zugsicherung eines Warnung zeigenden Signals überfahren (gelb markierter Wert 1), welches offensichtlich Anlass für die eingeleitete Bremsung gibt. Weitere Aufzeichnungen durch Zugbeeinflussungssysteme sind keine ersichtlich; die Spalten ZS_Halt, ZUB_Warnung und ZUB_Halt beinhalten alle den Wert Null. Auch die permanente Magnetschienenbremse PMS befindet sich über das gesamte betrachtete Zeitintervall in gelöster Stellung.

Sekunden	Strecken_KM	V Ist	V Soll	Beschleunigung	FL-Spannung	Leistung	Fahrschalter	Führerbremsventil	ZS_Warnung	ZS_Halt	ZUB_Warnung	ZUB_Halt	PMS
542	44.199	125.0	125	-0.002	16.000	399088	89.473	5	0	0	0	0	0
543	44.199	125.0	125	-0.002	16.000	399088	89.473	5	0	0	0	0	0
544	44.24	125.0	125	0.001	16.000	499219	89.473	5	0	0	0	0	0
545	44.28	125.0	125	0	16.000	537761	89.473	5	0	0	0	0	0
546	44.321	125.0	125	0	16.000	585873	89.473	5	0	0	0	0	0
547	44.363	125.0	125	0.011	16.000	461340	89.473	5	0	0	0	0	0
548	44.403	125.0	125	-0.031	16.000	0	8.771	5	0	0	0	0	0
549	44.403	125.0	125	-0.031	16.000	0	8.771	5	0	0	0	0	0
550	44.444	125.0	125	-0.026	16.000	-182251	-57.232	5	0	0	0	0	0
551	44.483	124.8	125	-0.084	16.000	-1821094	-99.534	5	0	0	0	0	0
552	44.524	124.3	125	-0.161	16.000	-3432110	-99.534	5	0	0	0	0	0
553	44.564	123.5	125	-0.245	16.000	-4952523	-99.534	5	0	0	0	0	0
554	44.605	122.4	125	-0.298	16.000	-6247892	-99.534	5	0	0	0	0	0
555	44.643	121.2	125	-0.317	16.000	-6249901	-99.534	5	0	0	0	0	0
556	44.643	121.2	125	-0.317	16.000	-6249901	-99.534	5	0	0	0	0	0
557	44.681	120.0	125	-0.316	16.000	-6252116	-99.534	5	0	0	0	0	0
558	44.721	118.7	125	-0.321	16.000	-6254350	-99.534	5	0	0	0	0	0
559	44.76	117.4	125	-0.324	16.000	-6256678	-99.534	5	0	0	0	0	0
560	44.797	116.1	125	-0.328	16.000	-6258894	-99.534	5	0	0	0	0	0
561	44.835	114.8	125	-0.332	16.000	-6261277	-99.534	5	0	0	0	0	0
562	44.871	113.5	125	-0.336	16.000	-6263546	-99.534	5	0	0	0	0	0
563	44.871	113.5	125	-0.336	16.000	-6263546	-99.534	5	0	0	0	0	0
564	44.908	112.1	125	-0.34	16.000	-6265988	-99.534	5	0	0	0	0	0
565	44.944	110.8	125	-0.351	16.000	-6268324	-99.534	5	0	0	0	0	0
566	44.981	109.3	125	-0.365	16.000	-6270877	-99.534	4.041	0	0	0	0	0
567	45.018	107.7	125	-0.471	16.000	-6273810	-99.534	4.041	1	0	0	0	0
568	45.052	105.5	125	-0.649	16.000	-6277684	-99.534	4.041	0	0	0	0	0

SUTER 2013

Tabelle 13: Ausschnitt eines Datensamples des Fahrsimulators Re 460 FASI. In der ersten Spalte sind die Sekunden 542 bis 568 nach Übungsstart aufgeführt. In den restlichen Spalten ist die Struktur und Beschaffenheit der im Sekundentakt erhobenen Daten erkennbar.

Diese Exportdaten aus dem Fahrsimulator bilden zusammen mit den Datenerhebungen aus den Fragebogen die Grundlage für die Auswertung der Fallstudien mit Probanden.

4.6.3 Der Fahr Simulator ZUSI 3

Dieses Simulationsprogramm wurde vom deutschen Unternehmen ZUSI Bahnsimulatoren in Braunschweig mit der Idee entwickelt, auch andere Systemelemente wie Stellwerke, Fahrplan, Betriebsführung usw. mit einzubeziehen (vgl. Abbildung 47). Der Simulator wird von einigen Bahnunternehmungen für die Ausbildung von Lokführer und von Institutionen wie das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) für die Forschung eingesetzt. ZUSI 3 basiert auf einem digitalen Geländemodell und einer Anzahl von Instrumenten, mit welchen die Infrastruktur direkt ab Karten und Plänen sowie anhand von Daten modelliert werden kann. Dazu werden topografische Karten und Gleispläne den Koordinatensystemen der einzelnen Länder entsprechend georeferenziert, damit sie mittels Gleisplaneditor von ZUSI 3 verarbeitet werden können. Für die Modellierung wird ein xml-Datenformat verwendet, railML-Daten können hingegen nicht direkt verarbeitet werden.

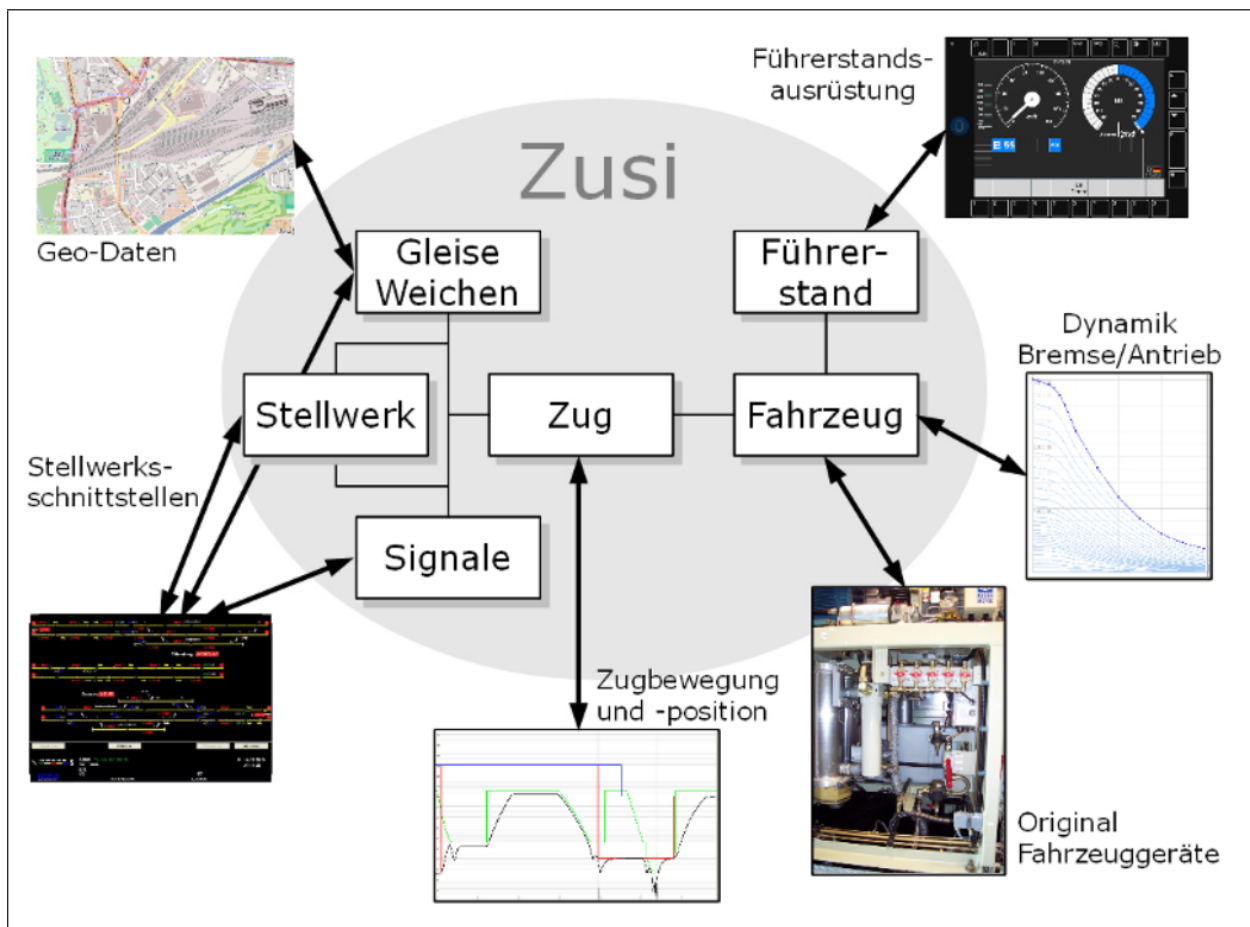


Abbildung 47: Visualisierung der Systemsimulation ZUSI 3. Das Programm erlaubt die Integration von Fahr simulatoren und Stellwerken. (Quelle: www.zusi.de, 06.12.2013)

Der Entwickler des Programms beschreibt ZUSI als „stark vorbildorientierte, PC-basierte 3D-Eisenbahnfahrsimulation, der Schwerpunkt liegt also beim virtuellen Fahren eines Zuges.“ (HÖLSCHER 2013: 1.1.1) Ganz besonders interessant erscheint auch die Idee der Systemsimulation, welche folgende Möglichkeiten bietet: (www.zusi.de, 06.12.2013)

- „Fahrzeughardware kann über eine Schnittstelle mit den Fahrdaten der Simulation versorgt werden, um das Verhalten der Hardware interaktiv in verschiedensten Konstellationen testen zu können,
- Geodaten können in den Editor übernommen werden, damit ein präzises Modell eines Streckennetzes oder auch der umgebenden Landschaft automatisiert erstellt werden kann,

- Fahrtverläufe in Laborvorgängen oder anderen externen Anwendungen können über den Fahrsimulator visualisiert werden, indem die Fahrdaten über eine Schnittstelle in den Simulator gespeist werden und dieser die 3D-Grafik ohne eigene Berechnung der Fahrdynamik darstellt,
- Infrastruktur kann bei Neu-/Umbauten bereits vor der Erstellung im Simulator befahren werden, z.B. zur Beurteilung von Signalstandorten, Sichtbarkeit usw.,
- Untersuchungen aus dem Bereich Psychologie und Ergonomie sind am Simulator i.d.R. besser als im echten Fahrzeug durchführbar (Reproduzierbarkeit, Handhabbarkeit usw.),
- Demonstration aller Arten von Peripherie interaktiv und in Echtzeit“.

Das Programm nutzt, so weit wie aus Sicht des Entwicklers möglich, Standard-Datenformate und funktioniert mittels IP-Schnittstellen, welche die Anbindung von Hardware wie Lokführerstände und Stellwerke erlaubt. Es ist vorgesehen, die in Abschnitt 4.2 vorgestellte Middleware so zu entwickeln, dass das Programm ZUSI 3 im Sinne der vorgesehenen Systemsimulation mit Führerständen und Stellwerken kommunizieren kann.

4.7 Vergleichende und empirische Analysen von Simulatoren

In diesem Abschnitt geht es darum, bestehende Simulatoren und Simulationsprogramme aus dem Eisenbahnbereich im Hinblick auf ihre Eignung für die Integration in ein gesamtes Simulationssystem zu vergleichen. Die Ergebnisse daraus sollen der Bewertung und Auswahl der am besten geeigneten Simulatoren für den Aufbau eines Referenzmodells auf der Teststrecke dienen. Konkret wurden drei Simulatoren ausgewählt, die in Bezug auf ihre technische Beschaffenheit (Detaillierungsgrad, Visualisierung/Geländemodell, Verfahren für die Modellierung für Strecken, Schnittstellen für die Kommunikation mit externen Systemen) Eigenschaften aufweisen, die mit der eigens entwickelten Middleware kompatibel sind und die sich untereinander vergleichen lassen. Durch die vergleichende Analyse können bekannte Erfahrungen in die Untersuchung mit einbezogen werden, womit auch die aus statischen und dynamischen Modellen sowie aus den Fallstudien mit Simulatoren generierten Ergebnisse plausibilisiert werden können.

Die eigentliche Visualisierung des Geländes für den Lokführer im Simulator wurde durch das Forschungslabor empirisch untersucht. Zu diesem Zweck wurde als Referenzmodell eine Grossleinwand für Rückprojektion mit 5 m Breite und 3 m Höhe angefertigt. Auf der Basis dieser Projektion für die Simulatoren LOCSIM und ZUSI 3 konnten Erfahrungen aus vielen Fallstudien festgehalten und für die Beurteilung von Anforderungen an die Landschaftsvisualisierung für die ideale Konstruktion eines Fahrsimulators herbei gezogen werden.

Simulator Triebfahrzeugtyp	FASI Re 460	LOCSIM Re 4/4	ZUSI 3 Re 4/4
Verfahren für die Modellierung			
- Import von Infrastrukturdaten	nein	bedingt*	ja
- Auflösung der Streckenmodellierung	sehr gut	bedingt*	sehr gut
- Anwendungsfreundlichkeit	gut	mittelmässig	gut
- Aufwand für die Modellierung	mittel	mittel	hoch
Schnittstellen für den Datenaustausch			
- Ausgang für Simulationsparameter	nein	Neuentwicklung	Neuentwicklung
- Eingang für Infrastrukturparameter	nein	Neuentwicklung	Neuentwicklung

Visualisierung Geländemodell			
- Detaillierungsgrad Gelände	mittel	sehr hoch	mittel bis hoch
- Orientierung im Gelände (sich Auskennen)	mittel	sehr hoch	mittel bis hoch
- Vielfalt und Authentizität der Infrastruktur	hoch	hoch	hoch
Detaillierungsgrad Simulator			
- Authentizität Führerstand	sehr hoch	hoch	hoch
- Authentizität der Funktionen	sehr hoch	mittel	mittel
- Dynamisches Fahrverhalten	sehr hoch	tief	tief
* Verarbeitung von Infrastrukturdaten für die Streckenmodellierung möglich, jedoch vom Entwickler nicht offenbart.			SUTER 2013

Tabelle 14: Übersicht über die Auswahl der drei für die vorliegende Untersuchung relevanten Simulatoren. Eine erste Gegenüberstellung zeigt die grossen Unterschiede in der Beschaffenheit, besonders zwischen den Simulatoren FASI im Vergleich mit LOCSIM und ZUSI 3.

4.8 Simulator des Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR verfügt über einen integrierten Simulator, bei welchem Lokführer und Zugverkehrsleiter gleichzeitig mit einbezogen sind. Dabei wird der Führerstandsimulator (RailSET) für die Human Factor Forschung an Triebfahrzeugführern genutzt. So zum Beispiel werden Blickbewegungen oder das Thema der Monotonie untersucht. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, reale Hardware zu integrieren, um beispielsweise mit einer Onboard-Unit eine Streckenprojektierung zu testen. Nach dem bisher Pilotstudien durchgeführt werden, wird der Simulator gegenwärtig die ersten Studien vollständig durchgeführt. (ASBACH, schriftliche Stellungnahme am 12.02.2014)

4.9 Anforderungen an das Simulationsinstrumentarium

Als Grundlage für die Analyse des Eisenbahnsystems müssen die relevanten Elemente definiert und im Hinblick auf ihre Vernetzung und ihre Rolle im System betrachtet werden. Daraus gehen wichtige Sensitivitäten hervor, welche bei Eingriffen in einzelne Elemente die Überlebensfähigkeit des gesamten Systems beeinflussen können. Diese Erkenntnisse sind für die Modellierung des Eisenbahnsystems deshalb wichtig, da das Modell für Untersuchungen von komplexen Problemen, welche sich auf der Systemebene auswirken können, eingesetzt werden soll.

Der Einfluss von Lokführer und Zugverkehrsleiter ist für die Steuerung des Eisenbahnsystems im Moment der Betriebsführung zentral. (HAMMERL 2011: 84) Vor dem Hintergrund der Ergebnisse aus der Systemanalyse, nach welchen Veränderungen bei den Lokführern und Zugverkehrsleitern in Verbindung mit der Betriebsführung zu unkontrollierbaren Reaktionen führen können, geht die besondere Stellung dieser beiden Berufstätigkeiten im Gesamtsystem hervor. Aus bisherigen Untersuchungen kann festgestellt werden, dass bei den Triebfahrzeugführern schlecht vorhersehbare, beeinflussbare und komplexe Situationen sowie ein geringes Selbsteinwirkungsgefühl als besonders belastend wirken.

Aus Sicht der Zugverkehrsleiter ist die Zahl der zu überwachenden Züge und das Auftreten von Störungen massgebend für deren Beanspruchung. (HAMMERL/FELDMANN 2009: 316) Bis heute werden Fahrsimulatoren und Stellwerksimulatoren getrennt und ausschliesslich zu Ausbildungszwecken eingesetzt. So zum Beispiel steht die Entwicklung eines neuen Simulationssystem für Zugverkehrsleiter der SBB vor dem Hintergrund der wachsenden Komplexität des Bahnbetriebs und sich erhöhende Anforderungen. So soll ein System unter Abbildung der wirklichen Infrastruktur für der Ausbildung örtlicher Besonderheiten und realistischer Störfallszenarien dienen (ROTH/BOLIN 2012: 13-14) - ohne Einbezug der Lokführer.

4.10 Die Teststrecke Emmenmatt/Zollbrück - Obermatt Langnau im Emmental

Für die Anwendung und den Vergleich von Methoden für die Datenerhebung, Datenverarbeitung, Modellierung und Simulation, insbesondere für die Integration von Stellwerk und Fahrsimulator wurde die Teststrecke Emmenmatt / Zollbrück - Obermatt - Langnau im Emmental auf der Bahnlinie Bern - Entlebuch - Luzern ausgewählt. In Obermatt zweigt die Bahnlinie der damaligen Emmenthalbahn (später EBT, dann RM, heute BLS) Richtung Ramsey - Burgdorf ab (Abbildung 48).

Das Stellwerk der Signalstation Obermatt eignet sich deshalb zu Untersuchungszwecken, weil es sich um eine kleine, aber standardisierte Sicherungsanlage handelt. In Obermatt waren sämtliche Typen von Stellwerken im Einsatz:

- von 1933 bis 1953: Mechanisches Stellwerk vom Typ Bruchsal G
- von 1953 bis 1989: Elektromechanisches Schalterwerk vom Typ INTEGRA
- von 1989 bis 2004: Relaisstellwerk vom Typ INTEGRA Domino 69
- seit 2004: Elektronisches Stellwerk

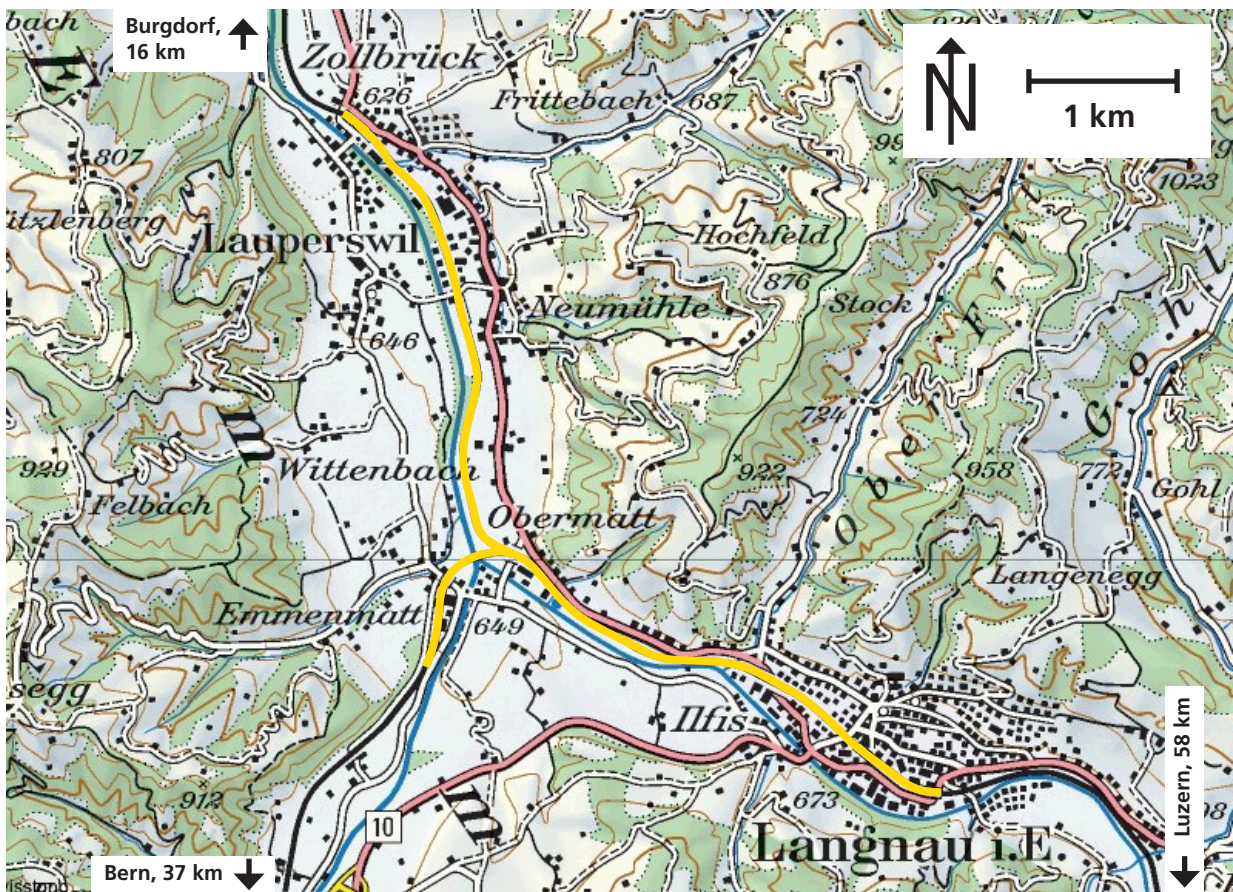


Abbildung 48: Örtliche Situation der Bahnlinien in der Umgebung der Signalstation Obermatt. Die Teststrecke zwischen den Orten Emmenmatt, Zollbrück, Obermatt und Langnau ist gelb markiert. (<http://map.geo.admin.ch>, 18.12.2013, geändert)

Die Teststrecke lässt sich nach Bedarf auf die ganze Bahnlinie ausdehnen, welche eine sehr heterogene technische und betriebliche Beschaffenheit aufweist. Die Strecke ist meist einspurig mit einzelnen Doppelspurabschnitten und verfügt über Signale sowohl des Systems L als auch des neueren Systems N. Sie weist Steigungen und Gefälle bis zu 23‰, einzelne grössere Brücken, in Bern den 1080 m langen Lorraine-Viadukt, sowie nebst einigen kleinen Tunnels den 1134 m langen Zimmeregg-Tunnel bei Luzern auf. Zudem sind über 70 Bahnübergänge sowie Bereiche mit Einfluss von Naturgefahren (Instabile Hänge, Rutschungen, hydrologische Gefahrenzonen usw.)

vorhanden. Auf der Linie Bern - Entlebuch - Luzern verkehren sowohl regelmässige Züge des Personenverkehrs (Regionalexpress, S-Bahn) als auch des lokale Güterzüge des Einzelwagenladungsverkehrs (EWLV). Aus diesen Angaben geht hervor, dass sich die gesamte Linie sehr gut als Teststrecke für vielfältige Untersuchungen über die Infrastruktur und die Betriebsführung eignet. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Streckenprofile der für die Versuche relevanten Streckenausschnitte Langnau - Emmenmatt (Abbildung 49) und Langnau - Zollbrück (Abbildung 50).

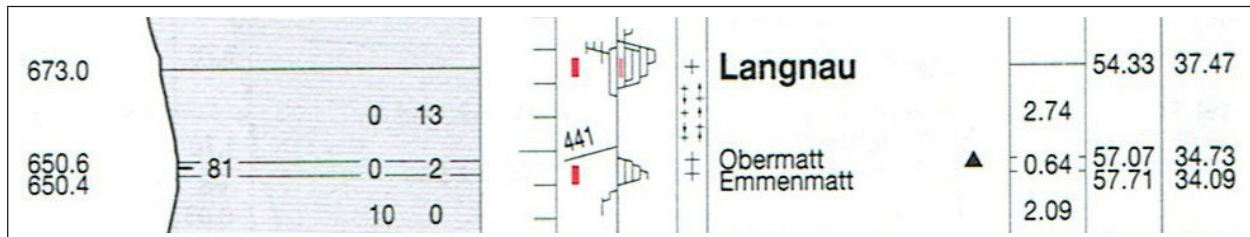


Abbildung 49: Auszug aus dem Streckenprofil der Bahnlinie 460 Bern - Langnau - Entlebuch - Luzern (Infrastruktur der SBB). In Obermatt ist die Abzweigung der Linie 441 nach Burgdorf zu erkennen. Zwischen den Stationen Emmenmatt und Obermatt liegen nur 640 m, wobei der Zusammenfluss von Emme und Ilfis auf einer 81 m langen Brücke überquert wird. Aus Richtung Bern beträgt das maximale Gefälle 10‰ und die maximale Steigung 13‰. Das Dreieck bei der Station Obermatt weist auf eine Dienststation ohne kommerziellen Personen- und Güterverkehr hin. (WÄGLI 2010: 59)

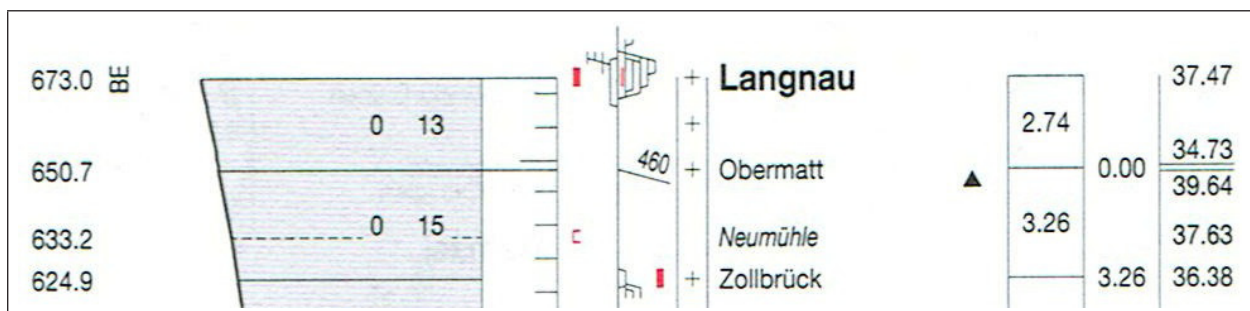


Abbildung 50: Auszug aus dem Streckenprofil der Bahnlinie 441 (Langnau -) Obermatt - Ramsei - Burgdorf, welche von der SBB-Linie 460 abzweigt (vgl. Abbildung 48 oben), wozu die Signalstation Obermatt dient. Das Stellwerk Obermatt war bis ins Jahr 1989 örtlich besetzt. Der Streckenabschnitt verläuft entlang der Emme und weist im Sinne der Kilometrierung ein maximales Gefälle von 15‰ auf. (WÄGLI 2010: 55)

Die einfache, jedoch standardisierte Situation auf der ausgewählten Teststrecke erlaubt die Modellierung der Sicherungsanlagen und der Infrastruktur unter Berücksichtigung der Machbarkeit mit Hinblick auf die für die vorliegende Arbeit vorhandenen Ressourcen.

4.11 Modellierung der Eisenbahninfrastruktur

Die Untersuchungen über die Modellierung für die Integration von Stellwerken und Fahrsimulatoren zeigen die Zweckmässigkeit und Notwendigkeit für die Anwendung von Standards bezüglich Datenformate, Methoden und Instrumenten.

Der Modellierung von Daten stehen hinsichtlich Import vorhandener Daten, Aufwand für die Verarbeitung, Visualisierung des Geländes und Anwendbarkeit der Modelle grossen Herausforderungen gegenüber. Im Rahmen dieser Arbeit wurden dazu zwei grundsätzliche Visualisierungstypen untersucht: Der videobasierte Ansatz der Instrumente QRailScan (Datenerfassung) und LOCSIM (Fahrsimulator) sowie die 3D Geländemodelle der Fahrsimulatoren FASI und ZUSI 3. Mit den

Erfahrungen bezüglich Eignung der Modellierung von Daten für die erwähnten Fahrsimulatoren wurde eine Nutzwertanalyse durchgeführt. Die Modelle müssen auch für die Verwendung der Stellwerksimulatoren visualisiert werden können. Dieser Aspekt kann jedoch mangels Ressourcen nicht im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden. Für die Bewertung wurden die oben erwähnten Herausforderungen als gewichtete Hauptkriterien verwendet und ihrerseits in gewichtete Unterkriterien aufgeteilt. Nebst den Möglichkeiten für die Nutzung (Anwendbarkeit) wurde das Kriterium des Imports von Infrastrukturdaten hoch gewichtet. Bei den Unterkriterien liegt der Fokus besonders auf den Möglichkeiten für die Verwendung des standardisierten Datenformats railML, wobei jedoch keiner der drei betrachteten Simulatoren in der Lage ist, solche Daten zu verarbeiten. Abgesehen davon erscheinen der Aufwand für die Modellierung der Infrastruktur, Eindruck und Wahrnehmung, Detaillierung und Auflösung des Geländemodells sowie die mögliche Integration der Stellwerklogik als höher gewichtete Unterkriterien für die Bewertung.

Aus der in Tabelle 15 dargestellten Nutzwertanalyse geht hervor, dass der videobasierte Ansatz bezüglich Modellierung der Landschaft sowie Detaillierung und Auflösung der Visualisierung erwartungsgemäss gute Resultate erzielt. Obwohl sich die 3D-Visualisierungen der Landschaft bei Computer regenerativen Systemen in den letzten Jahren sehr stark entwickelt haben, verfügt das Videobild heute noch über eine höhere Auflösung. In Bezug auf Freiheiten bei der Modellierung und Gleisbenützung bei der Anwendbarkeit weisen die 3D-Modell basierten Simulatoren Vorteile auf. Die nachteilige Bewertung des Simulators FASI hat - wie oben erwähnt - vor allem damit zu tun, dass zwischen der Entwicklung von FASI und ZUSI 3 fast 15 Jahre vergangen sind. Es ist anzunehmen, dass die modernen Simulatoren des Herstellers des FASI heute Aspekte wie zum Beispiel Datenimport für die Modellierung und Schnittstellen für die Stellwerklogik berücksichtigen und anwenden.

Beurteilungskriterien	Gewichtung		LOCSIM (Video)		FASI (3D-Modell)		ZUSI 3 (3D-Modell)	
	%	%	Bewertung	Punkte	Bewertung	Punkte	Bewertung	Punkte
Import von Infrastrukturdaten	30%							
Datenimport vorgesehen bzw. prioritär		30%	3	0.27	1	0.09	5	0.45
Berücksichtigung von railML		50%	1	0.15	1	0.15	1	0.15
Handhabung des Instruments (Modellierung)		20%	2	0.12	5	0.30	4	0.24
Aufwand für die Modellierung	20%							
Infrastruktur		40%	5	0.40	4	0.32	4	0.32
Landschaft		30%	6	0.36	3	0.18	5	0.30
Freiheit der Modellierung (Objekte)		30%	4	0.24	4	0.24	5	0.30
Visualisierung des Geländes	15%							
Gesamteindruck und Wahrnehmung		40%	4	0.24	4	0.24	5	0.30
Detaillierung und Auflösung		40%	6	0.36	3	0.18	5	0.30
Berücksichtigung von Umweltfaktoren		20%	2	0.06	4	0.12	4	0.12
Anwendbarkeit (Möglichkeiten für Nutzung)	35%							
Gleisbenützung		20%	3	0.21	6	0.42	6	0.42
Signale		20%	6	0.42	6	0.42	6	0.42
Stellwerklogik		40%	5	0.70	1	0.14	5	0.70
Ein- und Ausgänge für Umsysteme		20%	4	0.28	3	0.21	4	0.28
Total Punkte				3.81		3.01		4.30

SUTER 2014

Tabelle 15: Nutzwertanalyse zum Vergleich der Geländevisualisierungen der Fahrsimulatoren LOCSIM, FASI und ZUSI. Die Bewertungsskala entspricht dem schweizerischen Schulnoten (6 = sehr gut, 5 = gut, 4 = genügend, 3 = ungenügend, 2 = mangelhaft, 1 = nicht vorhanden).

Bei der Betrachtung der Ergebnisse muss auch in Betracht gezogen werden, dass die drei untersuchten Simulatoren unterschiedliche Baujahre aufweisen. Während der Fahrsimulator FASI mit Baujahr 1997 den heutigen Stand der Technik nicht berücksichtigen kann, befindet sich der Simulator ZUSI 3 erst im Abschluss seiner Entwicklung. Er baut beispielsweise auf einem Geländemodell auf, welches zu Zeiten der Entwicklung von FASI noch unerreichbar war.

Dem Vorteil der höheren Bildauflösung bei der videobasierten Visualisierung steht der Nachteil gegenüber, dass Objekte im Videobild nicht einfach entfernt oder ersetzt werden können. Die Berner Fachhochschule Biel hat mit ihrem Ansatz eine effiziente Methode geschaffen, die im Videobild aufgezeichneten Signale mittels Grafiken (bitmap) zu überdecken, damit sie im Sinne der Szenarien für die Simulationen animiert, d.h. umgestellt werden können. Diese Methode beschränkt sich jedoch auf den Fall, dass sich die Signale im Modell stets am gleichen Ort befinden und die gleiche Gestalt aufweisen, wie sie im Video aufgezeichnet worden sind. Soll die Infrastruktur mit anderen Signalen bzw. Signalstandorten modelliert werden, stören die auf dem Video aufgenommenen Objekte für die spätere Geländevisualisierung.

Die Filmproduktionsgesellschaft ELEMENT P aus Biel verfügt über erfahrene Spezialisten im Bereich der Videobearbeitung. Konfrontiert mit der Problemstellung betreffend Entfernen von Objekten in Videos haben sie sich freundlicherweise bereit erklärt, am Beispiel einer Videoaufnahme der Teststrecke Bern - Langnau - Entlebuch - Luzern das Einfahrtsignal in Obermatt zu retouchieren. In dieser Hinsicht können Videos nur schwer mit Fotos verglichen werden. Die Retouche kann nur mittels spezifischer Programme erfolgen, welche Objekte 25 Bilder pro Sekunde entfernen und die Lücke durch automatisches Ermitteln eines anhand der Umgebung möglichen Hintergrunds ersetzen können. Damit konnte der Nachweis der Machbarkeit des Retouchierens von Signalen in Videos erbracht, sowie Erkenntnisse über die Methoden und den dazu benötigten Aufwand gewonnen werden. Dabei kommt es auf die Komplexität der jeweiligen Umgebung (Landschaft oder Zivilisation) und die Bewegung im Hintergrund des Signals an. In Kurven und/oder Zivilisation (z.B. Autos) ist es schwieriger als bei Geraden und/oder Landschaften. In Abbildung 51 ist das Einfahrtsignal von Obermatt auf der Originalaufnahme deutlich erkennbar, während es in Abbildung 52 in der selben Videoaufnahme retouchiert wurde.

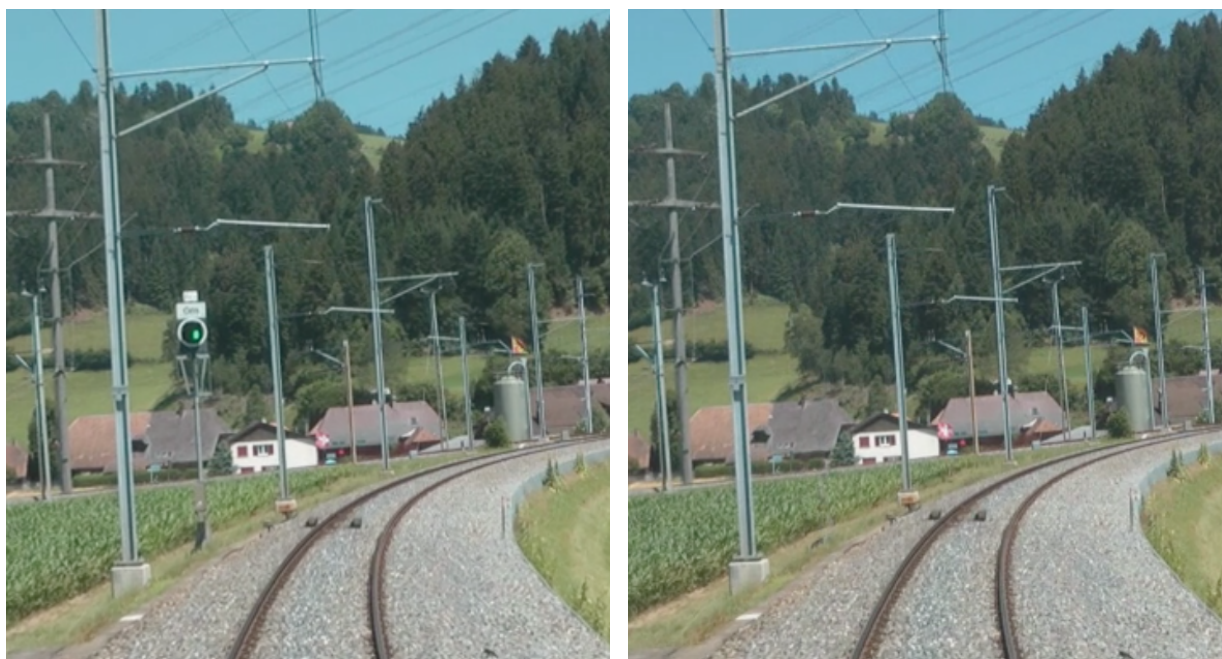


Abbildung 51 und 52: Entfernen des Einfahrtsignals der Station Obermatt in der Videoaufnahme. (Quelle: Versuchsvideo ELEMENT P, <http://www.desm.ch/index.php?page=2060>, 13.10.2013, Bild: LOCSIM, 13.11.2012)

Das hier gezeigte Beispiel ist als eher komplex einzustufen (Häuser und Leitungsmasten im Hintergrund). Für das Entfernen eines Signals in der Videoaufnahme ist wie folgt vorzugehen:

- Anfang und Ende der zu bearbeitenden Aufnahme bestimmen (In-/Out-Punkt auflisten),
- zu entfernende Fläche definieren (Form um Signal herum zeichnen),
- Bewegung des Signals analysieren (Motion Tracking),
- Hintergrundfläche(n) definieren (können mehrere sein: z.B. Häuser hintereinander),
- Bewegung des Hintergrundes analysieren,
- Objekt entfernen lassen (automatischer, durch Rechenleistung zeitintensiver Vorgang),
- evtl. Anpassungen der Formen, falls das Resultat nicht zufriedenstellen ist,
- exportieren und in die Originalaufnahme einbauen.

Der Aufwand für diesen Vorgang wird auf durchschnittlich 1,5 - 2 Stunden pro Signal geschätzt. (VOGEL, schriftliche Stellungnahme am 10.02.2014)

In der in Tabelle 16 dargestellten Analyse wurde jedoch nicht berücksichtigt, dass sich auch die Anwendbarkeit unterscheidet: Insbesondere in Bezug auf die Freiheiten bei der Gleisbenützung sind bei LOCSIM Einschränkungen festzustellen, da alle im Simulator zu befahrenden Gleise mit der Kamera einzeln aufgezeichnet und bei der Modellierung als Verzweigung behandelt werden müssen. Im Beispiel als Grundlage für die Aufwandberechnung sind nicht sämtliche Gleise der betroffenen Bahnhöfe (Emmenmatt und Langnau) berücksichtigt worden.

Tätigkeit	Strecke	km	Min.	Min./km
Locsim*				
Videoaufnahme	Emmenmatt - Langnau	3.38	10	3
	Zollbrück - Obermatt	3.26	10	3
Modellierung von 7 Verzweigungen (30-60 Min. pro Verzweigung)	Emmenmatt/Zollbrück - Langnau	6.64	225	33,9
Modellierung von 26 Signalen	Emmenmatt/Zollbrück - Langnau	6.64	780	117,5
Total Min./km				157,4
FASI				
Modellierung Infrastruktur	Emmenmatt/Zollbrück - Langnau	6.64	480	72,3
Modellierung Landschaft	Emmenmatt/Zollbrück - Langnau	6.64	1440	216,9
Total Min./km				289,2
ZUSI 3				
Modellierung Infrastruktur	Emmenmatt/Zollbrück - Langnau	6.64	300	45,2
Modellierung Landschaft	Emmenmatt/Zollbrück - Langnau	6.64	1440	216,9
Total Min./km				262,1
*Quelle: ROHRER (schriftliche Stellungnahme vom 28.01.2014)				SUTER 2013

Tabelle 16: Zusammenstellung der zeitlichen Aufwändungen für die Modellierung der Teststrecke Emmenmatt/Zollbrück - Langnau mit verschiedenen Simulatoren.

Der Vergleich des Aufwands für die Modellierung von Strecken mit den für die vorliegende Arbeit verwendeten Fahrsimulatoren zeigt deutlich, dass der videobasierte Ansatz von LOCSIM offensichtlich die effizienteste Lösung darstellt, sofern keine Signale zu retouchieren sind.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass sowohl der videobasierte Ansatz als auch das 3D-Geländemodell ihre Stärken und Vorteile ausweisen können. Voraussetzung für die Anwendung ist, dass der Verwendungszweck mit den entsprechenden Anforderungen genau bekannt ist.

4.12 Erkenntnisse über die erforderliche Beschaffenheit der Simulatoren

Nachdem die Modellierung der Eisenbahninfrastruktur mit den zur Verfügung stehenden Instrumenten geklärt ist, müssen Überlegungen zur Anwendung der Modelle in den Simulatoren angestellt werden. Die Visualisierung der Geländemodelle mit Eisenbahninfrastruktur und -betrieb stellt ein zentraler Faktor für die erfolgreiche Umsetzung eines Simulators dar. Bei Untersuchungen von komplexen Problemstellungen an den Schnittstellen Mensch-Maschine steht typischerweise das Verhalten der Probanden (hier Lokführer und Zugverkehrsleiter) im Vordergrund. Es ist einfach zu verstehen, dass dabei die Plausibilität der Ergebnisse von einer möglichst hohen Realitätsnähe des Simulators abhängt. Diese Voraussetzung bestätigen auch erfahrene Instruktoren im Mechanisierten Ausbildungszentrum MAZ der Schweizer Armee in Thun. WÜTHRICH (mündliche Stellungnahme vom 23.01.2014) erachtet es aus seiner Sichtweise als unverzichtbar, dass die Umgebung für den Schüler bzw. Probanden eins zu eins stimmt. Der Arbeitsplatz im Simulator muss für eine erfolgreiche Anwendung bezüglich Dimensionen, wirkenden Kräften und Bedienungselemente genau authentisch abgebildet sein. Übertragen auf das Eisenbahn-Systemmodell bedeutet dies, dass die Führerstände der Fahrsimulatoren und Arbeitsplätze der Stellwerksimulatoren auch in Bezug auf die Umgebung genau originalgetreu gestaltet werden müssen. Bei den Tätigkeiten des Lokführers stehen die Beobachtung und Wahrnehmung der Fahrbahn, der Infrastruktur mit ihrer Umgebung, der Anzeigeelemente sowie des Verhaltens seines Zugs im Mittelpunkt. Der Zugverkehrsleiter hingegen konzentriert sich in erster Linie auf die Anzeigen am Stellwerk und die für die Betriebsführung wesentlichen Grundlagen (Fahrplan, zu beachtende Vorschriften, usw.). Das Beobachten des Bahnbetriebs in der Realität durch den Zugverkehrsleiter findet nur noch bei den örtlich bedienten Stellwerken statt, zudem verrichtet er diese Tätigkeit heute eher im Sinne einer Zusatzaufgabe. Aus dieser Feststellung geht hervor, dass die Visualisierung des Geländemodells für den Fahrsimulator eine wesentlich grössere Rolle spielt als für den Stellwerksimulator.

Im Forschungslabor wurde die optimale Visualisierung des Geländemodells am Beispiel der Fahrsimulatoren der Lokomotivtypen Re 4/4, Re 460 und Ae 6/6 untersucht, mit dem Ziel, mit einer Projektion eine möglichst realistische Sicht auf das Geländemodell zu erreichen. Diesen Versuchen liegen folgende Überlegungen zu Grunde (Abbildung 53 bis Abbildung 56):

- Die Sicht auf die Visualisierung muss durch die Umrandung der Fenster und nicht durch die Umrandung der Projektionsfläche begrenzt sein, da durch die gleichzeitige Wahrnehmung sowohl des Fensters im Führerstand und die dahinter liegende Landschaft das räumliche Empfinden verstärkt,
- Die Projektionsfläche soll mit einer Neigung von ca. 10° nach hinten positioniert sein, damit der Lokführer beim Blick nach unten vor die Lok möglichst lange auf der Visualisierung der Landschaft bleibt,
- Der Lokführer soll auch beim Aufstehen (z.B. bei Rangierfahrten) eine fensterfüllende Sicht auf die Projektionsfläche haben, sofern er sich nicht direkt an das Frontfenster bewegt.

Diese ersten Anforderungen wurden den Experimenten mit dem Führerstand der Re 4/4 und dem videobasierten Simulator LOCSIM zu Grunde gelegt. Als Lösungsansatz wurde eine Rückprojektionsleinwand entworfen, skizziert und versuchsweise umgesetzt.

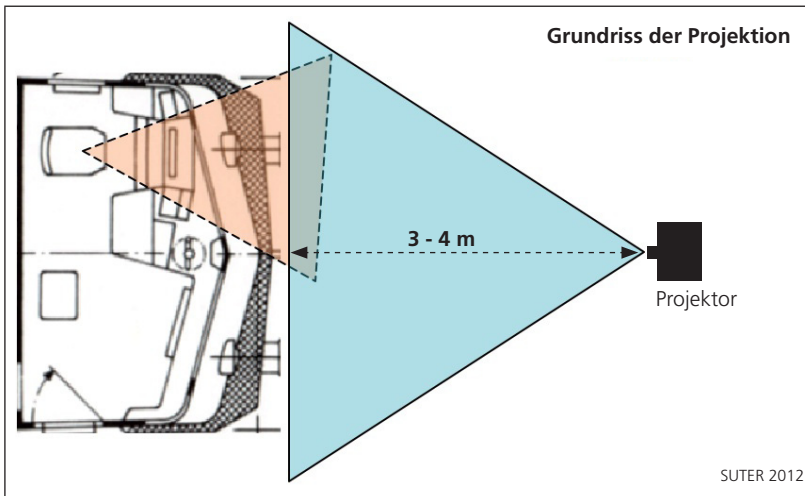


Abbildung 53: Skizze der Aufsicht einer Projektionsfläche, mit welcher die Sicht des Lokführers (und des Beifahrers) auf das Gelände durch die Fensterumrandung und nicht durch die Leinwand begrenzt wird.

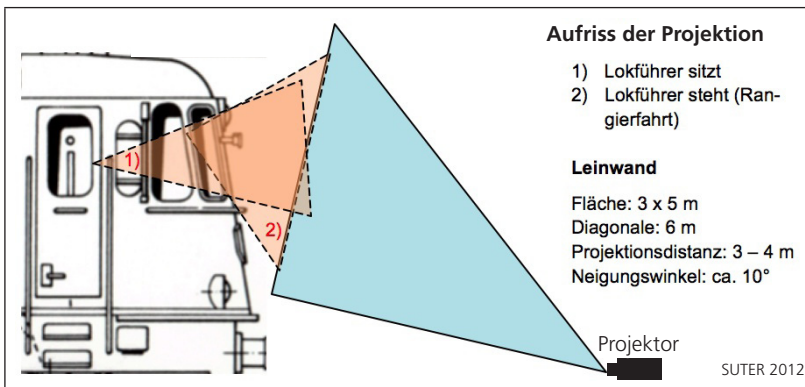


Abbildung 54: Skizze der Ansicht für eine geneigte Projektionsfläche, die dem Lokführer im Führerstand der Re 4/4 sowohl sitzend als auch stehend eine fensterfüllende Sicht auf die Visualisierung des Geländes erlaubt.

Dieser erste Lösungsansatz für eine Projektion des Geländemodells weist jedoch den Nachteil auf, dass die Visualisierung nur auf einer Fläche erfolgt, womit die räumliche Darstellung grundsätzlich nicht möglich ist. Die Versuche mit den Simulationen haben gezeigt, dass die Grösse der Leinwand diese Schwachstelle nur teilweise zu kompensieren vermag.



Abbildung 55 und 56: Versuchsaufbau der Leinwand im Forschungslabor für die Visualisierung des Geländemodells am Führerstand der Re 4/4. (SUTER, 21.01.2012)

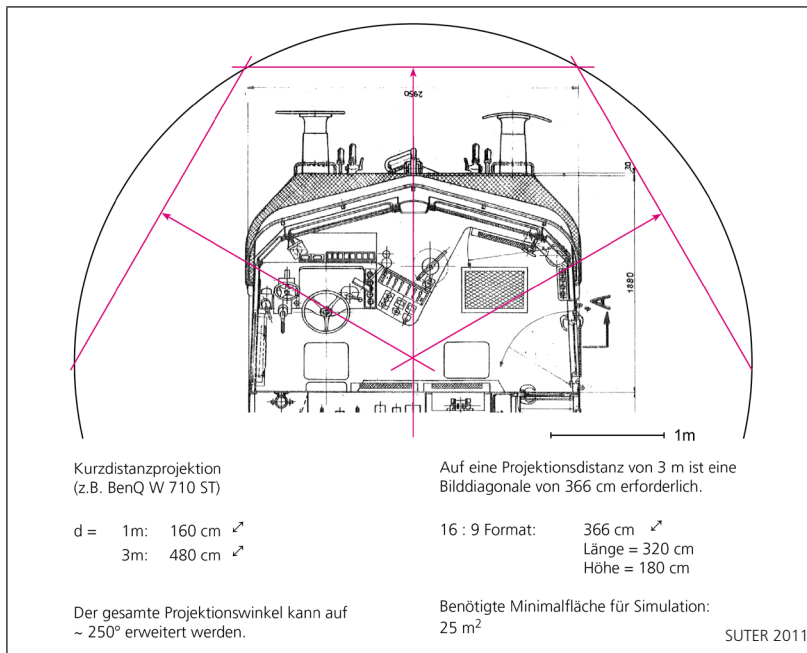
Bei der Anwendung der Projektion mit dem videobasierten Ansatz ist zu beachten, dass der Bildausschnitt vorgegeben ist und kaum verändert werden kann. Es hat sich gezeigt, dass der Kamerastandort bei der Aufnahme des Streckenvideos einen grossen Einfluss auf realitätsnahe Empfinden ausübt: Wenn die Perspektiven von Kamera und Lokführer im Simulator nicht übereinstimmen, hat dies eine unnatürlich wirkende Abweichung der Blickrichtung relativ zur Fahrzeugachse zur Folge (Abbildung 57). Diese Beobachtung lässt eine Eigenschaft der videobasierten Simulation zu Tage treten, wonach bei der Modellierung die örtliche Übereinstimmung von Kamera für die Streckenaufnahme und Einblick des Lokführers im Simulator anzustreben ist. Die Umsetzung dieser Anforderung ist nur mit einer Miniaturkamera möglich, welche die Sicht des Lokführers bei der Aufnahme der Strecke nicht behindert. Auf Grund der Tatsache, dass der Bildausschnitt beim videobasierten Ansatz vorgegeben ist, müssen für eine allfällige Erweiterung mehrere Aufnahmen synchron ausgeführt werden. Diese Notwendigkeit ergibt sich insbesondere dann, wenn das Gelände für den Lokführer im Sinne einer Rundschau auch seitlich visualisiert werden soll, womit die räumliche Wahrnehmung wesentlich optimiert werden könnte.

Anders verhält sich diese Problematik bei der Visualisierung des 3D-Streckenmodells, da sich in diesem Fall der Bildausschnitt für den Einblick in das Gelände bei der Projektion variabel verhält. Die Erweiterung des Bildausschnitts für die Anwendung einer Rundschau ist durch 3D-Geländemodell zur Frage der Rechnerkapazität. Für die Umsetzung der Rundschau werden mehrere Projektoren benötigt. Für eine durchgängige Geländeeinsicht auf einem Sektor von 180° werden drei bis vier Projektoren benötigt (vgl. Abbildung 58). Dieser Ansatz verbessert die subjektive Wahrnehmung des Raumes erheblich und erhöht damit das realitätsnahe Empfinden der Simulation durch den Lokführer.



Abbildung 57: Abweichung der Blickrichtung bzw. wahrgenommene Richtung der Gleisachse und der Fahrzeugachse bei der videobasierten Visualisierung des Geländemodells infolge unterschiedlichem Blickpunkt von Kamera bei der Aufnahme und Lokführer im Simulator. (SUTER, 11.05.2012)

Mit Verweis auf die Aussagen der Instrukturen des Mechanisierten Ausbildungszentrums, welche im vorangehenden Abschnitt zitiert wurden, ist der Erfolg von Untersuchungen im Bereich Human Factor an den Schnittstellen Mensch-Maschine vom Grad der Realitätsnähe des Simulators abhängig. Die Qualität von 3D-Visualisierungen kann bezüglich Informationsvermittlung gemessen werden, indem die Kriterien Validität und Glaubwürdigkeit zu beurteilen sind. Validität bezeichnet die Präzision und Angemessenheit hinsichtlich der Anwendung, mit der Glaubwürdigkeit wird die Konsistenz der Visualisierung bei wiederholter Anwendung und gegenüber der Zielsetzung bewertet. (WISSEN 2009: 59)



*Abbildung 58: Planskizze
für eine Rundschau mit drei
Projektoren, welche die Gelände-
einsicht in einem Sektor von
180° erlauben. Projekt für den
Simulator der Lok vom Typ Ae
6/6.*

Nebst der Visualisierung des Geländemodells stellt die Nachbildung der Fahrdynamik einen grundsätzlichen Bestandteil eines Simulators dar. Dazu werden typischerweise Bewegungssysteme eingesetzt, welche in der Lage sind, den Führerstand des Simulators in möglichst allen Freiheitsgraden zu bewegen. Dabei ist zu beachten, dass sich die mit dem Bewegungssystem erzeugten Kräfte von den Bewegungen des Fahrzeugs in der Realität unterscheiden und nur dazu erzeugt werden, um den Probanden ein möglichst realitätsnahes Nachempfinden der Fahrdynamik erlaubt. Auch ein Bewegungssystem, welches in der Lage ist, den Simulator zum Nicken, Wanken und Gieren zu bringen und somit alle sechs möglichen Freiheitsgrade anwenden kann, eignet sich nur beschränkt für Untersuchungen und insbesondere Schulungen, welche das Fahrgefühl des Lokführers betreffen. So zum Beispiel werden mittels Nicken der Führerkabine des Simulators die Wirkungen von Zug- und Bremskräften dargestellt, welche in der Realität durch die Trägheit der Masse zu Stande kommt. Währenddem also bei der Beschleunigung eines Zuges die Trägheitskräfte parallel zum Gleis wirken, zeigen sie beim Simulator durch die Dominanz der Normalkraft, die durch das rückwärts gerichtete Nicken des Führerstands hervorgerufen wird, in eine andere Richtung. Dadurch, dass die Kabine abgeschlossen ist und die Leinwand den Bewegungen der Kabine folgt, fehlt dem Probanden der Bezug zur realen Umwelt, womit er die Bewegung - wie gewünscht - als Beschleunigung interpretiert. Die Abbildung der Fahrdynamik erlaubt es dem Probanden, sich noch stärker auf seine Arbeit zu konzentrieren, was im Sinne der Untersuchungen eine hohe Masse an realitätsnahe Verhalten hervorruft.

Anlässlich der im Abschnitt 5.1 beschriebenen Fallstudien mit Lokführern auf den Simulatoren im Forschungslabor wurden den Probanden im Sinne einer qualitativen Datenerhebung Fragen über die Anwendung von Simulatoren im Eisenbahnwesen gestellt (vgl. Tabelle 17, unten). Nebst der Bewertung der im Labor benutzten und in den Abschnitten 4.6.1 und 4.6.2 beschriebenen Simulatoren der Loktypen Re 4/4 (LOCSIM) und Re 460 (FASI) wurden die Lokführer eingeladen, vorbereitete Aussagen über mögliche Anforderungen an Eisenbahnsimulatoren aus ihrer Sicht zu bewerten. Der Fragebogen vergleicht die beiden Simulatoren FASI und LOCSIM hinsichtlich Visualisierung (3D-Geländemodell versus Videobild), Fahrgefühl, Ausrüstung Führerstand und Funktionen. Da der LOCSIM zur Zeit über keine Modellierung der Fahrdynamik (Bewegungssystem) verfügt, kann dieser Aspekt nur beim FASI bewertet werden.

In Abbildung 59 ist ersichtlich, dass beim FASI insbesondere die Kriterien Fahrdynamik, Fahrgefühl, Detaillierung des Führerstandes sowie Funktionen im Führerstand sehr gut abschneiden.

Bei den Ergebnissen über die Visualisierung und Abbildung der Infrastruktur macht sich das offensichtlich veraltete 3D-Geländemodell bemerkbar. Die Bewertung letztgenannter Kriterien sind für den LOCSIM ähnlich, im Übrigen liegen gemäss Abbildung 60 die Ergebnisse jedoch deutlich hinter dem FASI zurück.

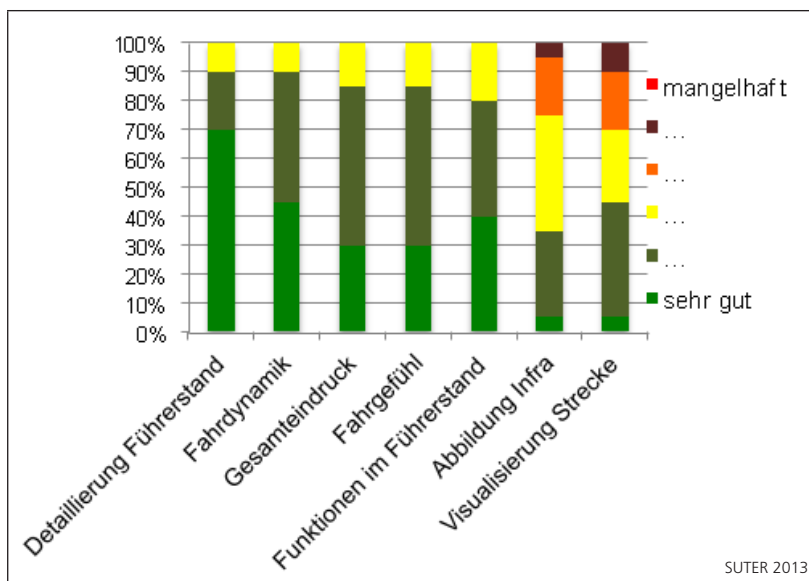


Abbildung 59 (s.a. Fragebogen Q4.2 im Anhang, Frage 1): Der FASI hinterlässt einen guten bis sehr guten Gesamteindruck, wozu vor allem die Detaillierung des Führerstandes, die Fahrdynamik und das Fahrgefühl beiträgt. Daraus kann der Schluss gezogen werden, dass das Bewegungssystem eine Notwendigkeit darstellt, damit sich die Lokführer realitätsnah verhalten.

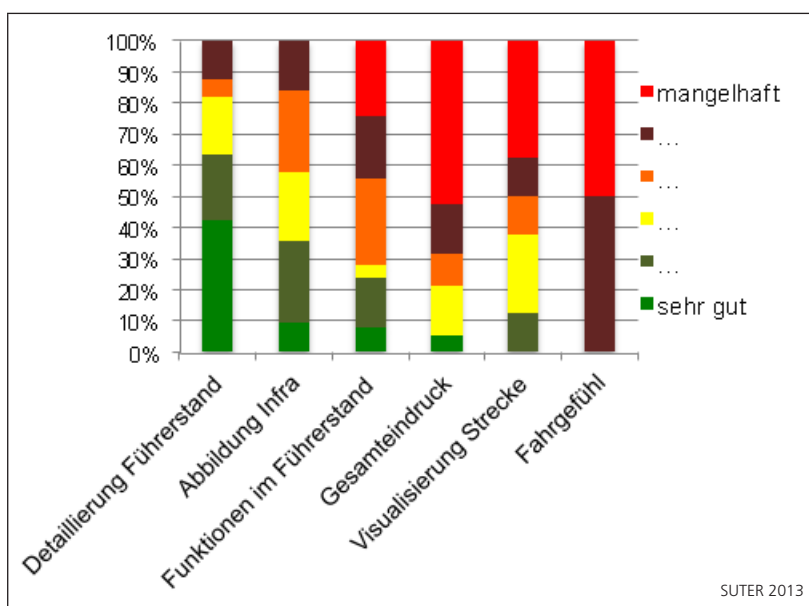


Abbildung 60 (s.a. Fragebogen Q4.2 im Anhang, Frage 2): Das Fahrgefühl im LOCSIM ist aus zwei Gründen mangelhaft: Erstens fehlt ein Bewegungssystem und zweitens muss die Projektion mit Rundsicht und abgeschlossener Kabine ergänzt werden. Der detaillierte Führerstand und Abbildung der Infrastruktur (Video) erhalten die meiste Zustimmung.

Die Ergebnisse über die Bewertung der beiden Simulatoren lassen vermuten, dass sich die beiden Simulatoren offensichtlich stark unterscheiden. Dazu ist zu bemerken, dass die Probanden zwei Übungen à 40 - 50 Minuten auf dem FASI und eine Übung à ca. 10 Minuten auf dem LOCSIM absolviert haben. Aus organisatorischen Gründen haben viele Probanden zuerst den wesentlich anspruchsvolleren Teil auf dem FASI absolviert, bevor sie sich mit dem LOCSIM konfrontiert sahen. Es kann angenommen werden, dass dieser Umstand die subjektive Wahrnehmung der Lokführer beeinflusst hat.

Zusammenfassend können aus der Bewertung in Abbildung 61 folgende Erkenntnisse gezogen werden: Integrierte Simulatoren unter Einbezug von Lokführer und Zugverkehrsleiter sind für die Untersuchung von komplexen Problemstellungen notwendig. Ein hoher Detaillierungsgrad und eine abgeschlossene Kabine bilden ebenfalls Grundvoraussetzung dafür, dass die aus den Simulationen gewonnenen Resultate mit der Realität annähernd vergleichbar werden. Zum Detaillierungsgrad kann auch die Simulation der Fahrdynamik (Bewegungssystem) gezählt werden.

Die Ergebnisse der qualitativen Datenerhebung im Rahmen der Fallstudien auf den Simulatoren unterstützen grundsätzlich die Erkenntnisse aus der Systemanalyse in Kapitel 3, insbesondere betrifft dies die Notwendigkeit von integrierten Simulatoren sowie von detailliert nachgebildeten Arbeitsplätzen für die Probanden. Der entsprechende Fragebogen Q4.2 ist im Anhang ersichtlich.

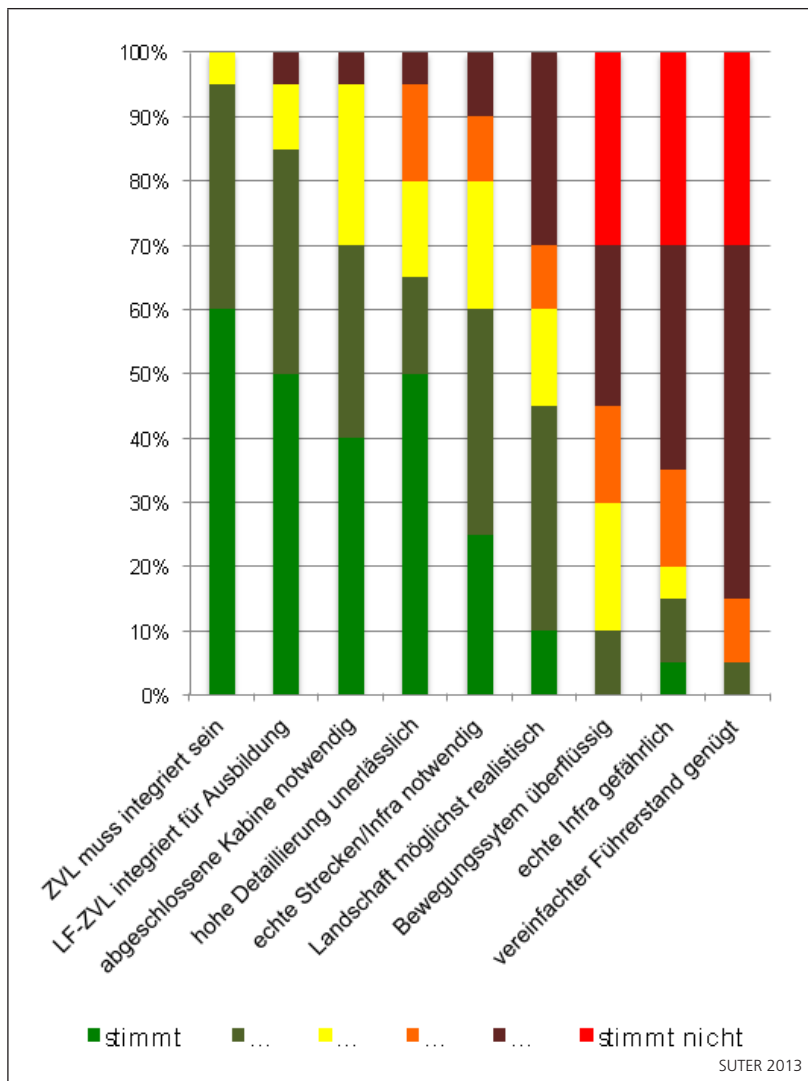


Abbildung 61 (s.a. Fragebogen Q4.2 im Anhang, Frage 3): Sehr hohe Zustimmung findet die Integration von Betriebszentrale und Fahrsimulator. Für den überwiegenden Teil der Lokführer ist die hohe Detaillierung des Führerstandes und eine abgeschlossene Kabine wichtig. Das gleiche gilt für das Bewegungssystem. Etwas weniger klar sind die Aussagen über die Modellierung der realen Infrastruktur. Das Gegenargument, dass falsche Lehren auf dem Simulator zu allfälligen Fehlhandlungen in der Realität führen kann, wird verworfen.

4.13 Fazit über die Untersuchungen im Labor

Die in diesem Kapitel vorgestellten Ergebnisse für die mögliche Gestaltung eines Eisenbahn-Systemmodells zeigen die Machbarkeit in verschiedenen Varianten mit ihren Vor- und Nachteilen auf. Ergänzende Experimente und Versuche sollen nachweisen, ob und unter welchen Bedingungen Lösungsideen umgesetzt werden können. Für die Integration von Stellwerk- und Fahrsimulatoren wurde eine Middleware entwickelt, welche den Informationsaustausch zwischen Führerstand und Stellwerk erlaubt. Für die Visualisierung der Strecke ist die Verwendung moderner 3D Geländemodelle mit einem Sichtfeld von 180° von Vorteil. Als wichtiger Faktor für die realitätsnahe Simulation von Triebfahrzeugen erweist sich der Einsatz eines Bewegungssystems, damit sich die Probanden durch die Nachbildung der Fahrdynamik besser auf ihre Rolle als Lokführer zu konzentrieren können.

Die Idee der integrierten Simulation knüpft auch an eine Idee aus früheren Zeiten an, als im Betrieb ein mangelndes gegenseitiges Verständnis zwischen den Berufen Lokführer und Zugverkehrsleiter als Schwachstelle erkannt wurde. Auf Initiative von Instruktoren beider Berufskategorien wurden

Kurse angeboten, welche es dem Personal ermöglichen sollte, einen Einblick in die Tätigkeiten der jeweils anderen Kategorie zu erhalten. Diese bereichsübergreifenden Kurse sind in der Zwischenzeit wieder verschwunden. (CHEVALIER, mündliche Stellungnahme am 13.01.2014)

Während in den Naturwissenschaften versucht wird, aus Beobachtungen der Vergangenheit und Gegenwart Voraussagen für die Zukunft zu gewinnen und die Analyse der Wirklichkeit im Vordergrund steht, wird bei der Konstruktion die Realisierung eines realen Objekts angestrebt. Ausgehend von einer verbalen Beschreibung der Aufgabe werden Informationen erarbeitet, weiter konkretisiert und zu einer Lösung zusammengeführt. (VIETOR 2011: 6ff) „Die Kunst der Modellbildung besteht darin, soweit wie möglich wegzulassen und zu abstrahieren, um auf diese Weise überschaubare Vorstellungen zu gewinnen.“ (SCHNIEDER 1993: 17)

5. Experimentelle Analysen

Basierend auf den Grundlagen im ersten Kapitel wurden unter Anwendung der in Kapitel 2 vorgestellten Methoden Analysen und Untersuchungen durchgeführt, deren Ergebnisse in diesem dritten empirischen Teil vorgestellt werden. Die Einordnung der einzelnen Ergebnisse in den Gesamtprozess für die Gestaltung eines Eisenbahn-Systemmodells richtet sich nach der grafischen Übersicht in Abschnitt 2.10, Abbildung 20. Die aus den Kapiteln 4 und 5 zusammengeführten Erkenntnisse bilden wiederum die Grundlage für die Diskussion und den Hypothesentest dieser Arbeit.

Für die Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit werden heute zwei Ansätze angewendet:

1. Aufgabenbezogen: Wird der Lokführer vor der Geschwindigkeitsschwelle rechtzeitig bremsen?
2. Situationsbezogen: Wie wird der Lokführer die situativen Bedingungen im gegebenen Szenario einschätzen?

Aufgabenbezogene Verfahren basieren in der Regel auf einfachen Aufgabenanalysen wie beispielsweise eine Mensch-Maschine-Systemanalyse, denn sie führen langfristig zu einer Verschlechterung der Robustheit des Systems, auf unvorhergesehene Situationen angemessen reagieren zu können. (STRÄTER/ARENIUS/ATHANASSIOU 2011: 24-27). Diese Verfahren vernachlässigen jedoch das Interpretations- und Entscheidungsverhalten des Menschen. Je komplexer mögliche Entscheidungssituationen für Lokführer und Zugverkehrsleiter werden (z.B. auf Grund komplexer Automatisierung oder Arbeitsorganisation), umso eher sind solche Entscheidungen sicherheitsrelevant. Mit situationsbezogenen Verfahren können die kognitiven Aspekte menschlicher Zuverlässigkeit besser analysiert werden. Mit dieser Eigenschaft leisten solche Verfahren einen wichtigen Beitrag für die Vorhersage komplexer Systeme.

In diesem Kapitel wird versucht, den Nutzen des Einsatzes von Simulatoren zu Forschungszwecken, insbesondere im Bereich Human Factors bei der Bahn aufzuzeigen. In einem ersten Teil werden die Ergebnisse aus den Fallstudien mit freiwilligen Lokführern vorgestellt, um anschliessend mögliche Themen darzustellen, zu welchen unter Anwendung von Simulatoren neue Erkenntnisse gewonnen werden können.

5.1 Fallstudien mit Lokführern auf den Fahrsimulatoren

Insbesondere im Zusammenhang mit der Anwendung von Simulatoren müssen viele „weiche Faktoren“ untersucht werden. Bei solchen Faktoren geht es um Grössen, die nicht oder nicht vollständig messbar sind und mathematisch hergeleitet werden können. Für den Erkenntnisgewinn eignen sich daher standardisierte Fragebogen, auf welchen die Lokführer als Probanden bestimmte Sachverhalte aus ihrer Erfahrung einschätzen und bewerten. Dieses Vorgehen erlaubt eine Quantifizierung nicht messbarer Faktoren als Grundlage für eine eindeutige Auswertung mittels statistischer Methoden. WINTER (2000: 3) zeigt wichtige Voraussetzungen auf, welche bei der Anwendung von quantitativen Methoden zu beachten sind: Demnach müssen Untersuchungsgegenstand, relevante Inhalte und Beurteilungskriterien im Voraus genügend bekannt sein, insbesondere auch, um die quantitativen Forschungsinstrumente wie Fragebögen entwickeln zu können. Die Stichprobe wurde zufällig ausgewählt, es wurde jeder Lokführer zu den Fallstudien eingeladen, der sich auf die Ausschreibung gemeldet hat. An dieser Stelle wird nochmals darauf hingewiesen, dass der Zweck der Fallstudien dieser Arbeit aus dem Aufzeigen der Methodik für den Einsatz von Simulatoren besteht. Die Ergebnisse der Fallstudien sind statistisch nicht für Aussagen über die Sicherheit auf dem Schweizerischen Schienennetz geeignet.

In Zusammenarbeit mit der Hochschule für Angewandte Psychologie (FHNW) wurden im DESM-Labor auf zwei Fahrsimulatoren Fallstudien mit Lokführerinnen und Lokführern durchgeführt. Nachdem die Ergebnisse dieser Versuche in die Diplomarbeiten von drei Studierenden der FHNW eingeflossen sind, liefern sie wichtige Erkenntnisse für diese Arbeit, indem sie die Notwendigkeit von integrierten Simulatoren für die Untersuchung von komplexen Problemstellungen aufzeigen. Für die Versuche auf den Fahrsimulatoren wurden mindestens 12 Lokführerinnen und Lokführer benötigt, welche auf den Loktypen Re 460 oder Re 465 ausgebildet sind. In Zusammenarbeit mit den Eisenbahnunternehmen SBB und BLS konnten insgesamt 19 Lokführer und eine Lokführerin motiviert werden, an den Versuchen teilzunehmen. Die entsprechenden Termine wurden über die eigene Homepage <http://www.desm.ch> ausgeschrieben, wo sich die Interessenten online anmelden konnten. Pro Termin wurden mit maximal drei Probanden Versuche durchgeführt. Es musste darauf geachtet werden, dass die Informationen über die Versuche nicht weitergegeben werden konnten und keine persönlichen Daten bekannt wurden. Der Betrieb des Labors für die Versuche erforderte den Einsatz von jeweils vier Personen: einen erfahrenen Instruktionslokführer, einen Operator am Fahrsimulator FASI, einen Beobachter der Szenarien und Dilemmata sowie einen Betreuer der Lokführer und gleichzeitig Operator am Fahrsimulator LOCSIM (Abbildung 64).

Zu Beginn der Fallstudien wurden die demografischen Daten der Probanden erhoben (s. Fragebogen E1 im Anhang und Abbildung 62). Daraus können wichtige Aussagen über die Berufserfahrung gewonnen werden. Daten über die Verteilung der Berufsjahre auf Personen- und Güterverkehr beispielsweise dienen für den Test der Hypothese, ob zwischen den Fahrdaten und der Berufserfahrung Korrelationen festzustellen sind. Die Verteilung der Berufserfahrung der Probanden erscheint heterogen. Es haben sich sowohl junge Lokführer kurz nach Abschluss ihrer Ausbildung sowie sehr erfahrene Berufsleute an den Fallstudien beteiligt. Die Grafik in Abbildung 62 und Abbildung 63 zeigen die Verteilung der Berufsjahre. Um allfällige Korrelationen zwischen Berufserfahrung im Güter- und Personenverkehr und den Daten aus den Fallstudien zu berechnen, wird eine diesbezügliche Auswertung der demografischen Daten benötigt. Dabei gilt die Annahme, dass in gemischten Berufsjahren die Anzahl geführter Personen- und Güterzüge ungefähr gleich verteilt ist. Führt also ein Lokführer während einem Jahr beide Zugskategorien, wird dem Personenverkehr und dem Güterverkehr je ein halbes Jahr Berufserfahrung gutgeschrieben.

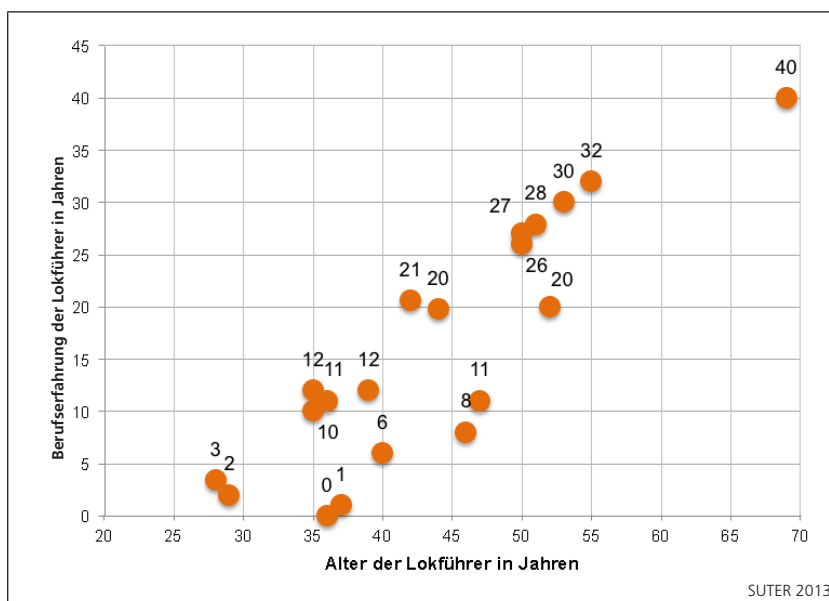


Abbildung 62: Verteilung der Lokführerinnen und Lokführer, die an den Fallstudien teilgenommen haben, hinsichtlich ihrer Berufserfahrung in Jahren. Allfällige Teilzeitarbeit wurde bei der Berechnung der Berufsjahre berücksichtigt.

Die Abbildung 63 verschafft einen Überblick über die Positionierung der Probanden hinsichtlich ihrer Berufserfahrung im Personen- und Güterverkehr.

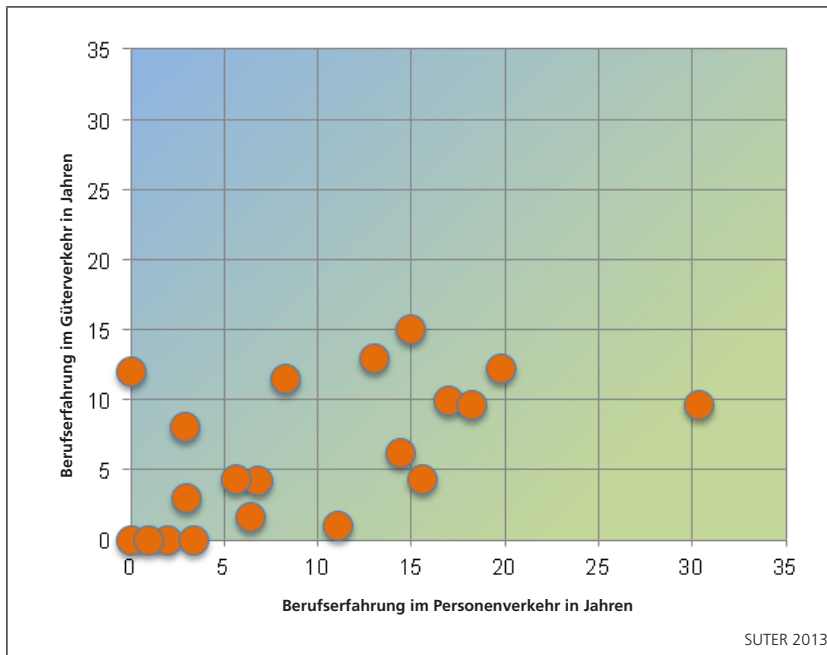


Abbildung 63: Verteilung der Berufserfahrung der Lokführerinnen und Lokführer hinsichtlich Güterverkehr (blau) und Personenverkehr (grün).

Die Versuche wurden hauptsächlich auf dem Fahrsimulator der Re 460 FASI, erbaut durch die Firma Krauss-Maffei Wegmann KMW (s.a. Abschnitt 4.6.2) durchgeführt. Es wurde jedoch auch der Fahrsimulator LOCSIM der Fachhochschule Biel (s.a. Abschnitt 4.6.1) eingesetzt. Die Lokführer wurden eingeladen, je einen Zug auf der Strecke Olten - Brugg (Szenario A) und einen auf der Strecke Baden - Zürich (Szenario B) zu führen. Dazu wurden zwei Drehbücher ausgearbeitet, nach welchen die Lokführer eine möglichst aufsteigende Zahl von Dilemmata zu bewältigen hatten. Anzahl und Schwierigkeitsgrad der Dilemmata sollten bei beiden Fahrten vergleichbar sein. Zusätzlich wurde als Übungsbestimmung auferlegt, dass jeder Lokführer je eine Fahrt ohne und die andere Fahrt mit Zeitdruck zu absolvieren hat. Somit ergaben sich insgesamt vier Varianten von Fahrten: Szenario A auf der Strecke Olten - Brugg und Szenario B auf der Strecke Baden - Zürich, jedes mit oder ohne Zeitdruck. Die vier Varianten wurden auf die Gesamtheit der Probanden gleichmässig verteilt, damit die Ergebnisse nicht von der Reihenfolge der absolvierten Übungen beeinflusst werden (Müdigkeit, Routine usw.). Beide Szenarien A und B enthalten je 14 Dilemmata, welche beobachtet, bewertet und/oder gemessen wurden. Für die Auswahl der Dilemmata wurden auch reale Ereignisse und Unfälle herbei gezogen. Die Drehbücher zu den Fallstudien können im Anhang dieser Arbeit eingesehen werden.

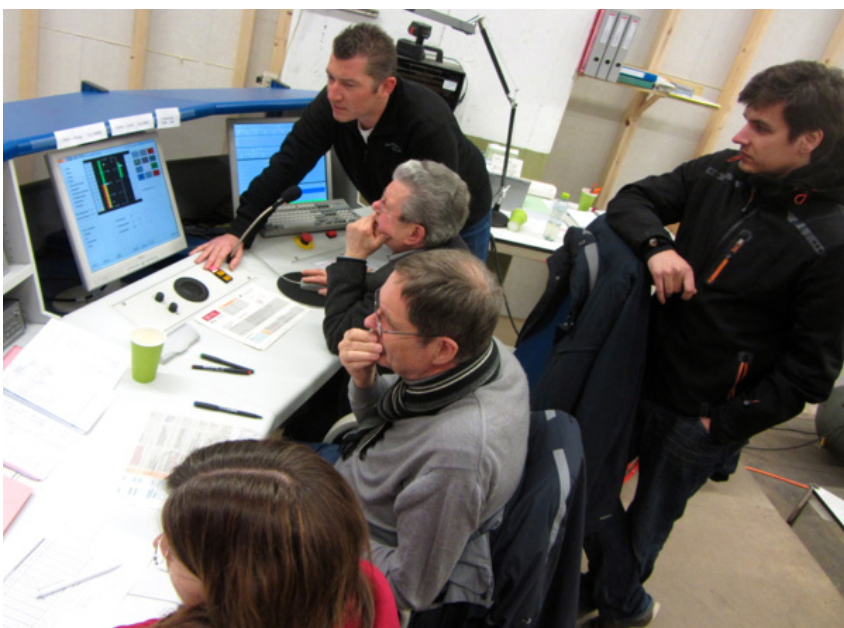


Abbildung 64: Beobachtung der Versuchsfahrt eines Lokführers durch die Fachexperten am Regiepult des Fahrsimulators FASI. Nebst der Studentin der FHNW sind zwei erfahrene Lokführer, der Operator des Simulators sowie der Informatiker anwesend.

Im Umfeld der Fallstudien wurden bei den Probanden quantitative und qualitative Datenerhebungen mittels Fragebogen und einigen Interviews durchgeführt. Während den Fallstudien wurden Daten mittels strukturierter Fragebogen erhoben. Dazu gehörten je ein Fragebogen zum Thema „Situation Awareness“ (10 Fragen), welche jeweils unmittelbar nach dem Absolvieren der Versuchsfahrt auf dem FASI durch Nicole Stoller der FHNW im Gespräch mit dem Lokführer/der Lokführerin erhoben wurde. Im Anschluss an die Fallstudien wurden die Probanden eingeladen, weitere zwei Fragebogen zu den Themen „Ergonomie und Betrieb“ (31 Fragen) sowie „Anwendung von Simulatoren“ (22 Fragen) mit standardisierten, geschlossenen Fragen zu bearbeiten, bei welchen jeweils eine vorgegebene Antwort auf einer Skala auszuwählen war. Die erwähnten Fragebogen sind im Anhang aufgeführt.

Die Anwesenheit einer Anzahl von Lokführerinnen und Lokführern wurde dazu genutzt, Erkenntnisse auf der Basis von Informationen über ihre Berufserfahrung und Fachkompetenz zu gewinnen. Der Inhalt der strukturierten Fragebogen ist in Tabelle 17 dargestellt. Die Antworten der Fragen dienen zum Teil auch der Interpretation der aus den Fallstudien auf dem Fahrsimulator erzielten Ergebnisse. Die vollständigen Fragebogen sind in Anhang ersichtlich. Die Auswertungen der Fragebogen werden in den Abschnitten 4.12 und 5.2 vorgestellt.

Nr.	Thema der Frage	Anzahl Fragen	Skala	Anzahl Stufen
Q4.1.1	Bewertung von Führerstandstypen	8	„mangelhaft“ bis „sehr gut“	6
Q4.1.2	Beurteilung der betrieblichen Lenkung mit zusätzlichen Informationen an den Lokführer	4	„störend“ bis „nützlich“, eine offene Frage	6
Q4.1.2	Persönliche Erfahrungen mit Adaptiver Lenkung (AdL) oder anderen Formen der betrieblichen Lenkung	5	„störend“ bis „nützlich“	6
Q4.1.3	Beurteilung möglicher Auswirkungen der Personalzufriedenheit	4	„tief“ bis „hoch“	6
Q4.1.4	Bewertung der Personalzufriedenheit im eigenen Umfeld	1	„tief“ bis „hoch“	6
Q4.1.5	Beurteilung von konkreten Gefahrenthemen	10	„nicht gefährlich“ bis „sehr gefährlich“, eine offene Frage	6
Total Fragebogen Q4.1		32		
Q4.2.1	Bewertung des Fahrsimulators Re 460 FASI	7	„mangelhaft“ bis „sehr gut“	6
Q4.2.2	Bewertung des Fahrsimulators Re 4/4 Locsim	6	„mangelhaft“ bis „sehr gut“	6
Q4.2.3	Beurteilung von gegebenen Anforderungen an Fahrsimulatoren	9	„stimmt nicht“ bis „stimmt“	6
Total Fragebogen Q4.2		22		

SUTER 2014

Tabelle 17: Übersicht über die Struktur der Fragebogen „Ergonomie und Betrieb“ Q4.1 sowie „Anwendung von Simulatoren“ Q4.2 für die quantitative Datenerhebung bei den Lokführerinnen und Lokführern anlässlich der Fallstudien auf den Simulatoren im Forschungslabor.

5.1.1 Organisation und Durchführung der Fallstudien

Offensichtlich haben in der Schweiz bisher nie solche Versuche mit Lokführerinnen und Lokführern und mit vergleichbarem Aufwand stattgefunden. Für die Versuche auf den Fahrsimulatoren wurden mindestens 12 Lokführerinnen und Lokführer benötigt, welche auf den Loktypen Re 460 (SBB) oder Re 465 (BLS) ausgebildet sind. In Zusammenarbeit mit den Bahnunternehmen SBB und BLS konnten insgesamt 20 Lokführer motiviert werden, an den Versuchen teilzunehmen. Die

entsprechenden Termine wurden über die Homepage <http://www.desm.ch> ausgeschrieben, wo sich die Interessenten gleich online anmelden konnten. Pro Tag/Abend wurden die Versuche mit maximal drei Lokführern durchgeführt. Es musste darauf geachtet werden, dass die Informationen über die Versuche nicht weitergegeben werden konnten und keine persönlichen Daten bekannt wurden. Alle Daten, welche mit den Simulatoren aufgezeichnet wurden, müssen anonymisiert werden und dürfen nach ihrer Auswertung nicht mehr einzelnen Personen zugeordnet werden können. Es ist lediglich den Probanden selbst möglich, allenfalls ihre eigenen Daten zu erkennen, sofern sie sich an entsprechende Einzelheiten während dem Verlauf der Fahrt erinnern können. Bei diesen Fallstudien geht es - im Gegensatz zur Ausbildung - nicht darum, die Ergebnisse einzelner Probanden, sondern die Gesamtheit der Ergebnisse zu beurteilen. Einzelne Resultate werden somit stets in den Kontext der Grundgesamtheit gestellt.

Ferner wurden die Probanden über die besonderen Umstände im Simulator informiert. Da der Simulator FASI vor über 15 Jahren konstruiert und in der Zwischenzeit nicht an die veränderten Umstände und Reglemente angepasst wurde, entspricht die Modellierung in einigen Teilen nicht mehr der heutigen Situation. So zum Beispiel haben sich sowohl die Infrastruktur (Signale, Fahrbahn, Bauten, usw.) als auch technische Gegebenheiten am Fahrzeug (Prozess der Türschliessung, ETCS usw.) verändert. Dem Lokführer wurden die entsprechenden Abweichungen mittels Merkblatt mitgeteilt.

5.1.2 Szenario A: Strecke Olten - Brugg

In Szenario A der Fallstudien sind insgesamt 14 Dilemmata enthalten, welche sich auf die in Kapitel 1 vorgestellten vier Problematiken beziehen. Die einzelnen Dilemmata stellten für den Lokführer normale betriebliche Situationen mit möglichst zunehmendem Schwierigkeitsgrad dar. Dabei wurde insbesondere auch ein Fall mit einbezogen, welcher erfahrungsgemäss zu Verwechslungen führen kann: Nach Abgabe des Befehl für „Fahrt auf Sicht“ darf der Lokführer nicht beim Halt zeigenden Hauptsignal vorbei fahren (vgl. Tabelle 18, Dilemmata AD5 bis AD8). Das Verhalten der Lokführer wurde durch Experten nach Drehbuch beobachtet und bewertet.

Die Aufgabe des Probanden bestand darin, den Reiseextrazug 33835 bei Tag mit eingeschränkter Sicht durch Nebel von Olten nach Brugg zu führen. Der Zug führte sechs mit Reisenden besetzte Personenwagen vom Typ EW IV mit. Demnach umfasste die Anhängelast des Zuges insgesamt 24 Achsen, 158 Meter Länge Gewicht und 300 Tonnen Gewicht. Das detaillierte Drehbuch für das Szenario A, die Streckentabelle und die notwendigen Beilagen für den Lokführer sind im Anhang ersichtlich.

Nr.	Beschreibung der Dilemmata	Erwartete Reaktion	Verweis FDV	Problematik (vgl. Kapitel 1)
AD1	Bremsprobe auf Wirkung	Durchführen der Bremsprobe auf Wirkung kurz nach Abfahrt in Olten	R 300.14, Zf. 2.3.7	D
AD2	Einleiten der Bremsung bei Warnung zeigendem Ausfahrersignal in Däniken <ul style="list-style-type: none"> V Strecke: 125 km/h, Kurze Reaktionszeit (ZUB) 	Einleitung der Bremsung vor dem Erreichen des Einfahrersignals.		D
AD3	V-Ankündigung 90 km/h während der Beschleunigung nach einem Streckenabschnitt mit verminderter Geschwindigkeit (Kurve).	Ermässigung der Geschwindigkeit zwischen Schönenwerd und Aarau durch V-Ankündigung auf 90 km/h.		D

AD4	Überprüfung der Bedingungen für die Abfahrt des Zuges.	Überprüfung der Türschliessung (Meldelampe im Führerstand).	R 300.6, Zf. 3.1.1	B
AD5 AD6 AD7 AD8	Halt zeigendes Einfahrtsignal an. <ul style="list-style-type: none"> • Erkundigen durch den Lokführer beim Fahrdienst. • Protokollpflichtiger Sammelbefehl 6 für Fahrt auf Sicht zwischen Rapperswil und Wildegg in Folge Isolierungsstörung. • Nach einer Minute Zustimmung zur Fahrt mittels Hilfssignal. 	<ul style="list-style-type: none"> • Zeit bis zur Meldung des Lokführers wegen Halt Stellung des Hauptsignals ohne offensichtlichen Grund, • Vollständigkeit des Protokolls auf dem Sammelformular, • Abwarten der Zustimmung zur Fahrt, • Ausführen der Fahrt auf Sicht 	R 300.6, Zf. 1.2.1 R 300.9, Zf. 2.4.3	C A
AD9 AD10	Halt in Wildegg. Übergang auf das rechte Gleis einer zweigleisiger Strecke mit Einrichtung für Einspurbetrieb.	Beachten des vorgeschriebenen Halts in Wildegg gemäss Fahrordnung sowie Überprüfung der Bedingungen für die Abfahrt des Zuges gemäss Fahrdienstvorschriften	R 300.6, Zf. 3.1.1 Zf. 4.5.2 Zf. 4.5.3	B
AD11 AD12	Halt in Schinznach-Bad.	Beachten des vorgeschriebenen Halts in Schinznach-Bad gemäss Fahrordnung sowie Überprüfung der Bedingungen für die Abfahrt des Zuges gemäss Fahrdienstvorschriften	R 300.6, Zf. 3.1.1	B
AD13 AD14	Einfahrsvorsignal von Brugg dunkel. Wegen fehlenden Streckengeräten (Balisen) funktioniert die Zugsicherung nicht.	Am Einfahrtsignal Brugg Halt erwarten und eine entsprechende Bremsung einleiten. Meldung der Störung am Fahrdienstleiter.		A

SUTER 2014

Tabelle 18: Verzeichnis der Dilemmata für die Versuchsfahrt auf der Strecke Olten - Brugg, s. a. Drehbuch für Übung DESM-01-OL-BGG im Anhang. (SUTER 2013: 8-12)

Zur Illustration des Szenarios aus der Sicht des Lokführers sind im Folgenden vier Situationen aus dem Drehbuch abgebildet und kommentiert. Die Bilder zeigen unter anderem auch, dass die Lokführer in der Schweiz zwei unterschiedliche Systeme von Haupt- und Vorsignalen beachten müssen (vgl. Abbildung 65 und Abbildung 66). Es handelt sich dabei um das traditionelle Signalsystem L (Lichtpunkte) aus den 1930er Jahren und das Nachfolgesystem N (numerisch) aus den 1980er Jahren. Beide Signalsysteme treten auf den Eisenbahnstrecken abwechselungsweise gemischt auf.



Abbildung 65 zu Dilemma AD2: Einfahrtsignal Däniken. Das Ausfahrsvorsignal zeigt Warnung, das nächste Hauptsignal zeigt somit Halt. Die Streckengeschwindigkeit beträgt 125 km/h, was eine rechtzeitige Reaktion erforderlich macht. (SUTER 2013)



Abbildung 66 zu Dilemma AD3: V-Ausführung 90 km/h am Einfahrtsignal von Aarau. Die entsprechende V-Ankündigung 90 km/h wurde am vorangehenden Signal erteilt. Dies ist eine planmässige Situation und stellt keine besonderen Anforderungen an den Lokführer. (SUTER 2013)



Abbildung 67 zu Dilemma AD4: Die Türkontrolllampe (Pfeil) muss vor der Abfahrt gelöscht sein. Der Lokführer muss die Türen verriegeln, bis die Türfreigabetasten (links und rechts vom Pfeil) nur noch schwach leuchten. (SUTER 2013)



Abbildung 68 zu Dilemma AD13: Das Einfahrsvorsignal Brugg ist dunkel (Störung). Im rechten Gleis fehlen die Streckengeräte für die Zugsicherung (Pfeil). (SUTER 2013)

Die Lokführer erhielten zu Beginn der Übung den Auftrag, Zug 33835 in Olten auf Gleis 7 vom Vorgänger zu übernehmen und als unbegleiteten (ohne Begleitung durch Zugpersonal) Personenverkehrs-Extrazug nach Brugg zu führen. Die Hälfte der Lokführer waren ohne Zeitdruck (Lf Nr. 1, 3, 4, 7, 11, 12, 13, 15, 16, 17), die andere Hälfte mit Zeitdruck unterwegs, indem sie dringend angewiesen wurden, in Brugg mit möglichst wenig Verspätung einzutreffen (Lf Nr. 2, 5, 6, 8, 9, 10, 14, 18, 19, 20).

5.1.3 Auswertung Szenario A

Für die Auswertung der Fallstudien wurden 13 von 14 Dilemmata herbei gezogen. Dabei wurden die Daten getrennt nach Fahrten mit und ohne Zeitdruck ausgewertet. Die folgenden zwei Abbildungen (Abbildung 69 und Abbildung 70) zeigen die prozentuale Verteilung der Fehler, wobei unter Zeitdruck die Fehler eher in der zweiten Hälfte der Fahrt aufgetreten sind. Bezüglich Anzahl der Fehler sind keine signifikanten Unterschiede zu erkennen.

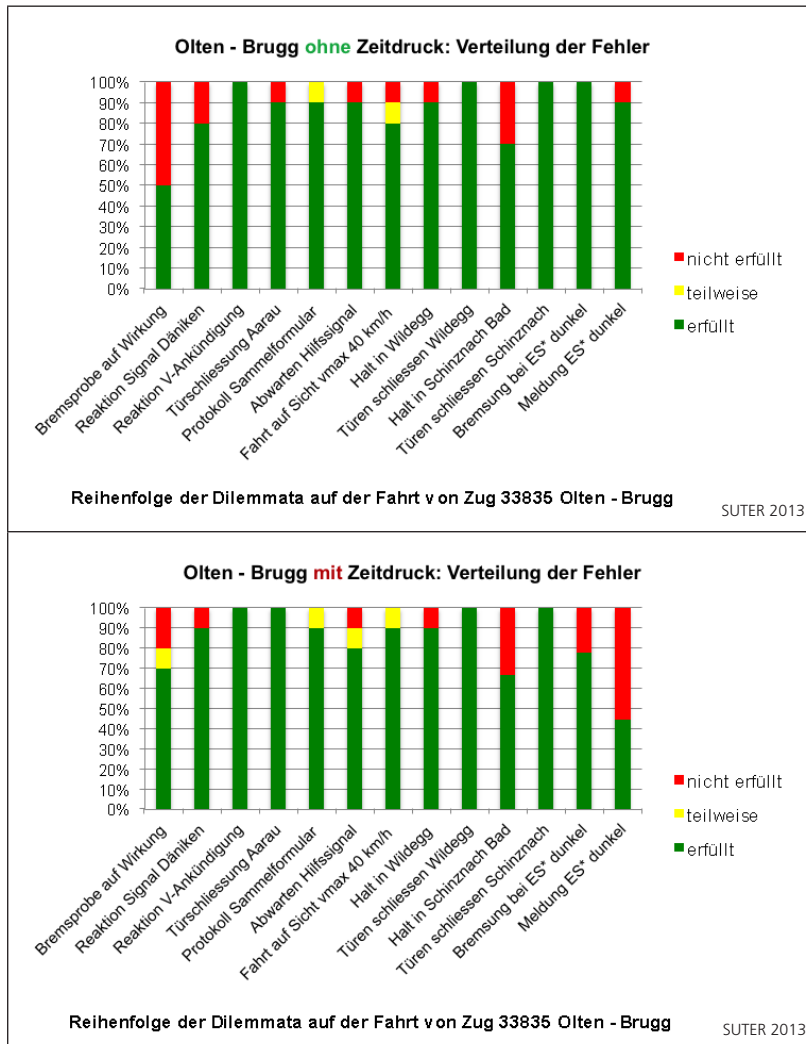


Abbildung 69: Verteilung der Fehler auf den Fahrten ohne besonderen Zeitdruck. Auf der x-Achse sind die beobachteten Dilemmata in ihrer chronologischen Reihenfolge aufgeführt.

Abbildung 70: Verteilung der Fehler auf den Fahrten unter Zeitdruck. In der zweiten Hälfte erhielt der Zug wegen einer Stellwerkstörung eine Verspätung. Es fällt auf, dass die letzten zwei Dilemmata im Vergleich zu den Fahrten ohne Zeitdruck eine höhere Fehlerquote aufweisen.

Aus den Beobachtungen geht hervor, dass die Bremsprobe auf Wirkung (vgl. Tabelle 18, Dilemma AD1) von 12 Probanden korrekt, von einem Probanden teilweise und von 7 Probanden nicht durchgeführt wurde. Dabei muss jedoch der in Abschnitt 5.3 über die Simulation der Fahrdynamik beschriebene Umstand in Betracht gezogen werden, wonach sich das Modell von der Realität unterscheidet. Die Bremsprobe auf Wirkung hängt in der Praxis stark mit dem Fahrgefühl zusammen, welches sich im Simulator durch die mit dem Bewegungssystem simulierten Kräfte nicht vollständig realitätsnah abgebildet werden kann. Auf dem Diagramm in Abbildung 71 ist die Ausfahrgeschwindigkeit von 40 km/h deutlich zu erkennen. Die Bremsprobe auf Wirkung erfolgt bei den meisten Lokführern im Bereich zwischen Km 39.6 und 40. Die Lokführer unter Zeitdruck (rote Graphen) fahren eher schneller als jene ohne Zeitdruck (blaue Linien).

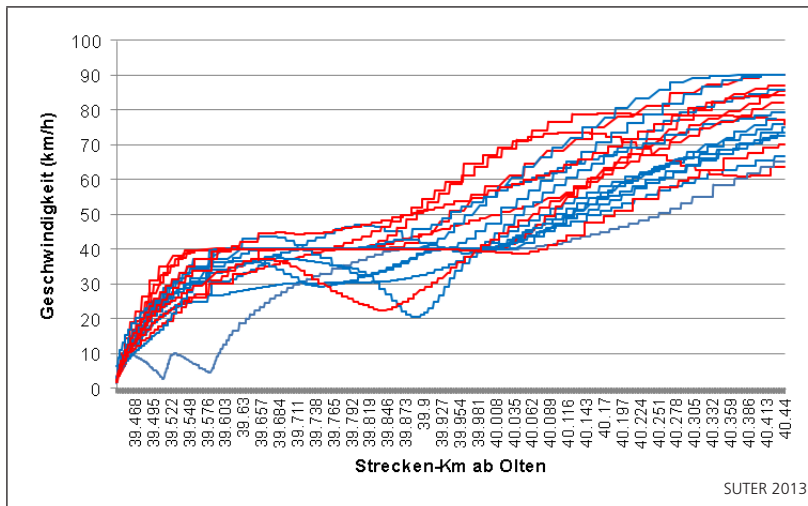


Abbildung 71 zu Dilemma AD1:
Auswertung der Fahrdaten
im Weg-Geschwindigkeits-
Diagramm.

Obwohl es gemäss Drehbuch beim Dilemma AD1 um den Prozess der Wirkungsbremsprobe geht, kann im Weg-Geschwindigkeitsdiagramm in Abbildung 72 festgestellt werden, dass jene Lokführer, die von der Übungsanlage her unter Zeitdruck fahren (rote Linien), insgesamt schneller beschleunigen als jene, welchen kein Zeitdruck auferlegt wurde (blaue Linien). Aus dem Gespräch mit den Lokführern geht dieser Unterschied nicht hervor, die Probanden vermittelten den Eindruck, dass sie unabhängig vom Zeitdruck gleichermassen fahren würden. In der Praxis ist jedoch der Zeitdruck ein Phänomen, das bis heute ständig zugenommen hat. Dabei können Ursachen geltend gemacht werden wie die ansteigende Netzbelastung, höhere Fahrplandichte, Kundenerwartungen, drohende Sanktionen bei Verspätungen sowie wirtschaftlicher Druck auf die Eisenbahnunternehmen. Wenn die Reaktion (Bremsung) erst nach dem Vorsignal eingeleitet wird, kann dies leicht zu einer Intervention der Zugbeeinflussung (ZUB) führen. In der grafischen Darstellung in Abbildung 70 sind in Folge eines Rechnerabsturzes vor Ende der Übung von Lokführer 9 keine Daten vorhanden.

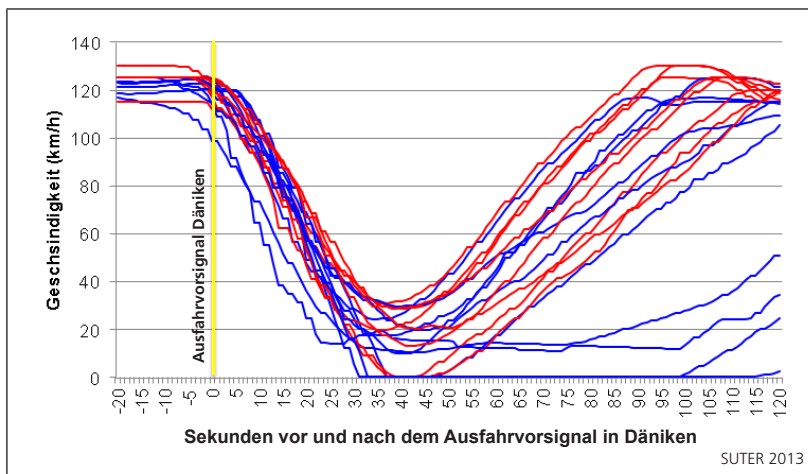


Abbildung 72 zu Dilemma AD2:
Verteilung der Reaktionen der
Probanden beim Ausfahrsvor-
signal Däniken in Warnstellung
(gelbe Linie, Halt erwarten).

Gemäss Dilemma AD2 (vgl. Tabelle 18) zeigte das Einfahrtsignal des Bahnhofs Däniken freie Fahrt, das am gleichen Standort angeordnete Ausfahrsvorsignal jedoch Warnung (*Halt erwarten*). Die zulässige Geschwindigkeit in diesem Bereich beträgt 125 km/h. Die Signale in diesem Bereich sind mit ZUB überwacht (linienförmiges Zugbeeinflussungssystem mit Überwachung der Bremskurve). Zwei Probanden wurden von der Situation überrascht und sind in die Bremskurve geraten, worauf die ZUB-Einrichtung interveniert hat. Das folgende Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm zeigt die Verteilung der Reaktionen der Lokführer. Der Mittelwert der Lokführer mit Zeitdruck scheint sich hinsichtlich der Geschwindigkeit über jenem der Lokführer ohne Zeitdruck zu bewegen:

Abbildung 73 zeigt die Reaktionen der Lokführer im Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm. Der Einsatz der Bremswirkung erfolgt teilweise vor und teilweise nach dem Warnung zeigenden Ausfahr-vorsignal (gelbe Linie, vgl. auch Dilemma AD2 in Tabelle 18). Für die Reaktion bleibt bei einer Streckengeschwindigkeit von 125 km/h wenig Zeit: Fünf Lokführer wurden überrascht, so dass der Zug durch die Intervention der Zugbeeinflussung ZUB zum Stillstand kam. Die Schwierigkeiten dabei bestehen einerseits aus fehlenden Streckenkenntnissen der betroffenen Lokführer, andererseits können infolge Bildauflösung bei der Geländevisualisierung des FASI die Signale später wahrgenommen werden als in der Realität. Die durch den FASI erfassten Daten von Lokführer 2 waren nicht plausibel und wurden weggelassen, jene von Lokführer 9 sind in Folge Rechnerabsturzes vor Ende der Übung nicht vorhanden.

Im Sinne des Dilemmas AD5 gemäss Drehbuch zeigte das Einfahr-vorsignal von Ruppertswil *Halt erwarten*. Die dort zulässige Geschwindigkeit beträgt 160 km/h. Der Schienenzustand und damit die Adhäsion waren infolge Regen eher schlecht, was bei starker Beschleunigung zum Schleudern der Triebäder führte. Dies wiederum hatte im Bereich von ZUB-überwachten Signalen eine Störungsanzeige (ZUB-Anzeige 8888 blinkend) zur Folge, da das Ergebnis der odometrischen Distanzmessung eine zu grosse Differenz gegenüber den punktuell übermittelten Streckendaten ergab.

Aus Abbildung 73 geht hervor, dass ein Lokführer die blinkende ZUB-Anzeige als ZUB-Ausfall interpretiert und die für solche Fälle vorgeschriebene Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h nicht überschritten hat. Nur 6 Lokführer haben die zulässige Streckengeschwindigkeit von 160 km/h erreicht, bevor sie das Einfahr-vorsignal Ruppertswil in der Stellung *Halt erwarten* erkannt haben. Während im Vorfeld des Vorsignals die Züge unter Zeitdruck (rote Graphen) eher schneller als jene ohne Zeitdruck (blaue Graphen) sind, kann bei der Annäherungszeit kein offensichtlicher Unterschied mehr festgestellt werden. Die Reaktion auf das Signal erfolgte von allen Lokführern einheitlich schnell: Die Zeit zwischen dem Anhalten des ersten und des letzten Zuges unterscheidet sich um mehr als 100 Sekunden. Es ist anzunehmen, dass die stark unterschiedlichen Annäherungszeiten hin zum Halt zeigenden Einfahr-signal in Ruppertswil auf die unterschiedliche Berufserfahrung der Lokführer bezüglich Güterverkehr und Personenverkehr zurück zu führen sind. Lokführer des Güterverkehrs sind sich langsamere Beschleunigungs- und Verzögerungsprozesse gewohnt und reagieren offensichtlich insbesondere bei ungewohnt hohen Geschwindigkeiten darauf, indem sie bei Warnung zeigenden Signalen die Bremsung früher einsetzen.

Im Zusammenhang mit dem Signalhalt Ruppertswil sind drei Dilemmata verbunden: Erstens wurde die Zeit gemessen, die bis zur Kontaktaufnahme mit der Betriebszentrale vergeht, zweitens wurde der Prozess der Anordnung eines Befehls für Fahrt auf Sicht bewertet und drittens wurde das Verhalten nach Abgabe des Sammelbefehls beobachtet (vgl. Tabelle 18, AD6 bis AD8). Da die ersten beiden Dilemmata von allen Probanden problemlos bewältigt wurden, wird auf das Ergebnis hier nicht weiter eingegangen. Das dritte Dilemma AD8 birgt hingegen – wie in Tabelle bei AD8 erwähnt – eine nicht unerhebliche Verwechslungsgefahr. Es zeigte sich, dass zwei von 20 Lokführern die Situation falsch eingeschätzt haben und ohne Berechtigung beim Halt zeigenden Einfahr-signal Ruppertswil vorbei gefahren sind. Diese Situation wurde bereits in Absatz 3.1 im Sinne einer komplexen Problemstellung eingehend vorgestellt. Im Rahmen dieser Arbeit konnte mit Hilfe eines Simulators der Nachweis erbracht werden, dass in solchen Situationen tatsächlich eine ernste Gefährdung besteht.

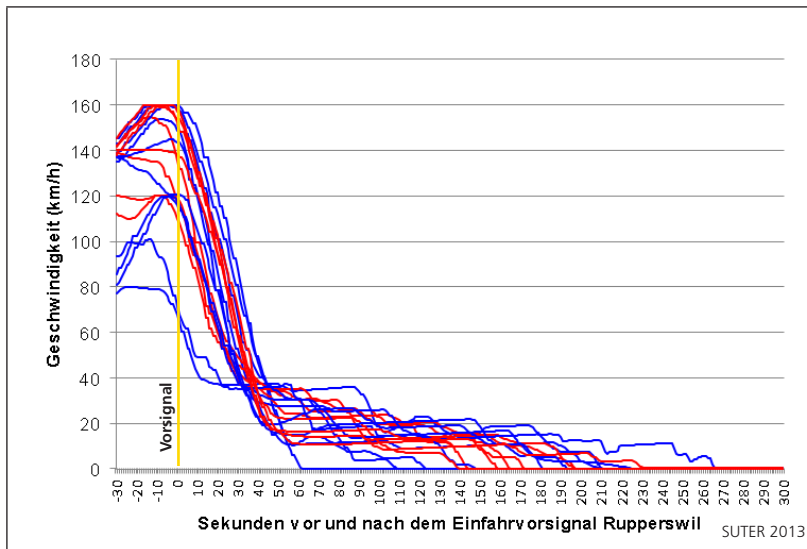


Abbildung 73 (zu Dilemma AD5) Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm der Annäherung an das Halt zeigende Einfahrersignal Rapperswil. Die Annäherungszeit bis zum Stillstand hingegen ist auf einem Zeitintervall von über 100 Sekunden verteilt.

Ab Wildeggen waren die Züge auf dem rechten Gleis und auf einer Strecke mit Einrichtung für signalmässigen Einspurbetrieb unterwegs (vgl. Tabelle 18, Dilemma AD10). Diese Situation konnte die Lokführer etwas verunsichern, da sie einerseits in der Praxis nur noch selten vorkommt und andererseits die Infrastruktur gemäss Visualisierung FASI ungenügend ausgebaut ist: Während der Fahrt auf dem rechten Gleis einer solchen Strecke sind die Signale des linken Gleises gültig – das rechte Gleis ist heute jedoch trotzdem mit den Streckengeräten für die Zugbeeinflussung ausgerüstet. Letzteres ist auf der FASI-Strecke zwischen Wildeggen und Brugg nicht der Fall. Das Dilemma AD13 mit dem dunklen Einfahrersignal war demnach auch das schwierigste, da ein solches Signal leicht übersehen werden kann. Auf der anderen Seite kann eine solche Störung in der Praxis bei einem Lampendefekt leicht auftreten, da die Signallampen bei den Vorsignalen in Serie geschaltet sind. Die Wahrscheinlichkeit einer solchen Störung in Verbindung mit fehlenden Streckengeräten für die Zugbeeinflussung ist nach dem heutigen Ausbaustandard der Infrastruktur hingegen gering.

Das Geschwindigkeits-Weg-Diagramm in Abbildung 74 zeigt die Züge bei der Einfahrt in den Bahnhof Brugg. Die von links erste gelbe Linie zeigt den Standort des (dunklen) Einfahrersignals. Der Lokführer müsste demnach am Einfahrersignal Halt erwarten. Die zweite gelbe Linie zeigt den Standort des Einfahrersignals in Brugg, welches Fahrbegegnung 2 (Geschwindigkeits-Ausführung 40 km/h) zeigte. Im Vorfeld des Vorsignals ist erneut erkennbar, dass die Probanden unter Zeitdruck (rote Linien) schneller unterwegs sind. 16 Probanden haben ihre Züge noch vor dem Einfahrersignal auf unter 20 km/h verzögert, bis sie das Fahrt (40 km/h) zeigende Signal erkannt haben. Die Daten von Lokführer 9 sind in Folge eines Rechnerabsturzes vor Ende der Übung nicht vorhanden.

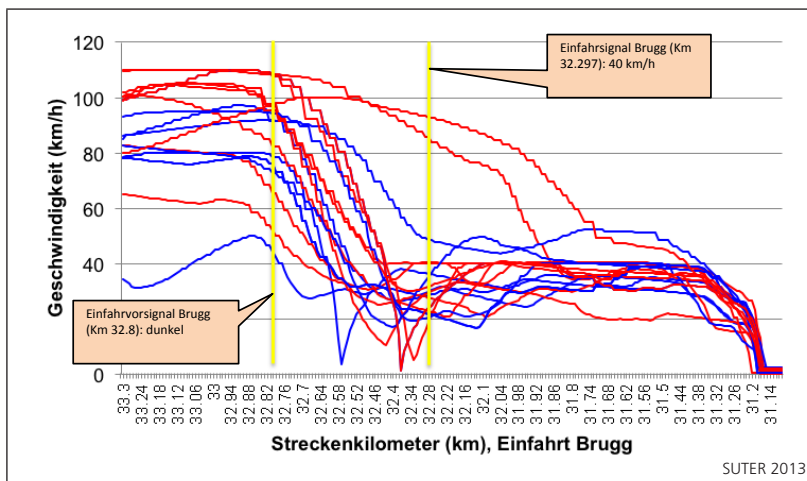


Abbildung 74 (zu Dilemma AD13) Geschwindigkeits-Weg-Diagramm ab Streckenkilometer 33.3 bis in den Bahnhof Brugg. Die meisten Lokführer haben das dunkle Einfahrersignal erkannt und die Geschwindigkeit vor dem Einfahrersignal so ermässigt, dass sie vor dem Signal hätten anhalten können.

5.1.4 Szenario B: Strecke Baden - Zürich

In Szenario B der Fallstudien sind - gleich wie in Szenario A - insgesamt 14 Dilemmata enthalten, welche sich auf die in Kapitel 1 vorgestellten vier Problematiken beziehen. Die einzelnen Dilemmata stellen für den Lokführer grundsätzlich gewohnte betriebliche Situationen mit möglichst zunehmendem Schwierigkeitsgrad dar. Dabei wurde ein aus der Praxis bekannter kritischer Fall mit einbezogen, welcher erfahrungsgemäss zur Fahrt mit überhöhter Geschwindigkeit führen kann: Bei einer im besonderen Verzeichnis aufgeführten Langsamfahrstelle war die Entfernung zwischen Vor- und Anfangssignal zu kurz bemessen. Wie schon bei Szenario A wurde das Verhalten der Lokführer wurde durch Experten nach Drehbuch beobachtet und bewertet.

Die Aufgabe des Probanden bestand darin, den Reiseextrazug 33837 bei Nacht von Baden nach Zürich HB zu führen. Die übrigen Bedingungen entsprechen dem Szenario A (s. Abschnitt 5.1.2).

Nr.	Beschreibung der Dilemmata	Erwartete Reaktion	Verweis FDV	Problematik (vgl. Kapitel 1)
BD1	Bremsprobe auf Wirkung	Durchführen einer Bremsprobe auf Wirkung (entweder während der Rangierfahrt oder kurz nach Abfahrt in Baden).	R 300.14, Zf. 2.3.7	D
BD2	Bei einem Zwergsignal leuchtet nur die obere Lampe.	Meldung der Störung an den Fahrdienstleiter.	R 300.9, Zf. 3.6	C
BD3	Überprüfung der Bedingungen für die Abfahrt des Zuges.	Überprüfung der Türschliessung (Meldelampe im Führerstand).	R 300.6, Zf. 3.1.1	B
BD4 BD5 BD6	Dilemmata folgen dicht aufeinander: <ul style="list-style-type: none"> Fahrzeugstörung: Meldung auf dem Diagnosesystem, Vorsignal der Langsamfahrstelle (80 km/h) gemäss Verzeichnis der Langsamfahrstellen. Distanz zwischen Vorsignal und Anfangssignal zu kurz bemessen (340 m für Ermässigung von 140 km/h auf 80 km/h), Schutzstrecke ein, welche nur mit ausgeschaltetem Hauptschalter befahren werden darf. 	<ul style="list-style-type: none"> Aufmerksamkeit auf Fahrweg und Strecke, Situationsgerechtes Handeln: 80 km/h beim Anfangssignal), Hauptschalter auszuschalten oder die Taste für das Befahren von Schutzstrecken zu drücken. 	R 300.13, Zf. 3.3.2 R 300.6, Zf. 4.2.3 Zf. 4.2.4	A
BD7	Ausfahrsvorsignal des Bahnhofs Dietikon in Warnstellung. Bei der Einfahrt in den Bahnhof Dietikon Umschalten des Ausfahrsignals des Nachbargleises.	Richtige Interpretation der Signale (nach wie vor Halt erwarten)		B
BD8	Zwischen Schlieren und Zürich Altstetten V-Ankündigung 60 km/h.	Standardmässige Einleitung der Bremsung.		D
BD9 BD10	Halts Zürich Altstetten	Beachten des vorgeschriebenen Halts in Zürich Altstetten gemäss Fahrordnung sowie Überprüfung der Bedingungen für die Abfahrt des Zuges gemäss Fahrdienstvorschriften.	R 300.6, Zf. 3.1.1	B

BD11 BD12	Unklarer Notruf über Zugfunk. Die Nachfrage beim Fahrdienstleiter wird jedoch nicht oder nicht klar beantwortet.	Nachfrage bei Fahrdienst. Ausführen von Fahrt auf Sicht (Vmax 40 km/h).	R 300.9, Zf. 14.1	C
BD13 BD14	Bei der Einfahrt in den Bahnhof Zürich HB leuchtet bei einem Zwergsignal nur eine der beiden unteren Lampen.	Schnellbremsung einleiten und Fahrdienst verständigen.	R 300.9, Zf. 3.6	D

SUTER 2014

Tabelle 19: Verzeichnis der Dilemmata für die Versuchsfahrt auf der Strecke Baden - Zürich HB, s. a. Drehbuch für Übung DESM-02-BAD-ZUE im Anhang. (SUTER 2013: 8-12)

Analog zu den Anforderungen an das erste Szenario A auf der Strecke zwischen Olten und Brugg wurde auch bei dieser Versuchsfahrt gefordert, die Probanden mit rund 10 Dilemmata mit ansteigendem Schwierigkeitsgrad zu konfrontieren. Zur Illustration des Szenarios aus der Sicht des Lokführers sind in Abbildung 75 bis Abbildung 79 Situationen aus dem Drehbuch abgebildet und kommentiert. Im Unterschied zum vorangehenden Szenario A ist sichtbar, dass die Lokführer bei diesem Szenario bei Nacht unterwegs sind:



Abbildung 75 zu Dilemma BD4: Meldung der Fahrzeugstörung im Führerstand mittels Störungslampe (roter Pfeil) und Diagnosemonitor links davon (SUTER 2013)



Abbildung 76 zu Dilemma BD7: Bei der Durchfahrt durch den Bahnhof Dietikon ist in der Ferne das Umschalten eines Signals zu beobachten. Es ist jedoch das Signal des Nachbargleises. (SUTER 2013)



Abbildung 77 zu Dilemma BD8: V-Ankündigung 60 km/h zwischen Schlieren und Altstetten. (SUTER 2013)



Abbildung 78 zu Dilemma BD11: Der Lokführer erhält einen unklaren Notruf und erkundigt sich beim Fahrdienstleiter über den Grund. (SUTER 2013)

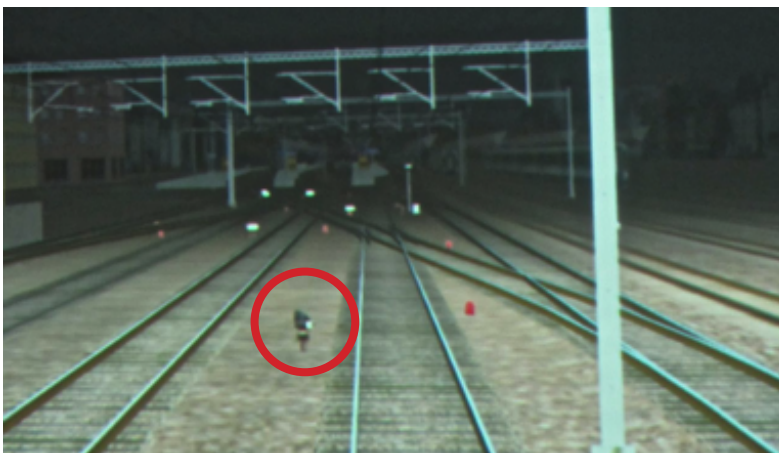


Abbildung 79 zu Dilemma BD13: Das folgende Zwergsignal bei der Einfahrt in den Bahnhof Zürich HB zeigt ein unklares Signalbild: eine Lampe leuchtet nicht. (SUTER 2013)

Die Lokführer erhielten den Auftrag, Zug 33837 in Baden ausserhalb des Bahnhofs zu übernehmen und als unbegleiteten (ohne Begleitung durch Zugpersonal) Personenverkehrs-Extrazug nach Zürich HB zu führen. Die Hälfte der Lokführer waren ohne Zeitdruck (Lf Nr. 2, 5, 6, 8, 9, 10, 14, 18, 19, 20), die andere Hälfte mit Zeitdruck unterwegs, indem sie dringend angewiesen wurden, in Zürich HB mit möglichst wenig Verspätung einzutreffen (Lf Nr. 1, 3, 4, 7, 11, 12, 13, 15, 16, 17).

Der für das vorliegende Szenario B vorbereitete Versuchszug besteht – wie im Szenario A – aus einer Lok Re 460 an der Zugspitze und sechs Personenwagen vom Typ EW IV als Anhängelast. Als zusätzliche Auflage für diese Versuchsfahrt musste das auf dem Simulator noch vorhandene Zugfunkgerät ZFK 88 in Betrieb genommen werden, da dieses für die Übermittlung benötigt wurde. Mit diesem Funkgerät fühlten sich insbesondere die jüngeren Lokführer nicht vertraut, da es vor einiger Zeit durch das moderne Kommunikationssystem GSM-R ersetzt wurde und heute nicht mehr in Betrieb ist. Diese Unsicherheit wurde gegen Ende dazu genutzt, einen unklaren Notruf abzusetzen um das gemäss FDV erforderliche Vorgehen (s. Tabelle 19, Dilemmata BD11 und BD12) auszulösen. Die Gesamtheit dieser Aufgabe sollte den Schwierigkeitsgrad gegen Ende der Versuchsfahrt wie gefordert erhöhen.

5.1.5 Auswertung Szenario B

Für die Auswertung der Fallstudien wurden alle 14 vorbereiteten Dilemmata berücksichtigt. Die Daten wurden getrennt nach Fahrten mit und ohne Zeitdruck (je 10 Lokführer) ausgewertet. Die folgenden zwei Abbildungen zeigen die prozentuale Verteilung der Fehler, wobei unter Zeitdruck

die Fehler eher in der zweiten Hälfte der Fahrt aufgetreten sind. Abbildung 80 und Abbildung 81 zeigen den Verlauf der Fahrt im Überblick. Im Vergleich zu Szenario A auf der Strecke Olten – Brugg ist hier bei der Verteilung der Fehler ein deutlicher Unterschied zwischen Probanden mit und ohne Zeitdruck erkennbar. Die Lokführer unter Zeitdruck weisen hier eine ungefähr doppelte Fehlerquote auf.

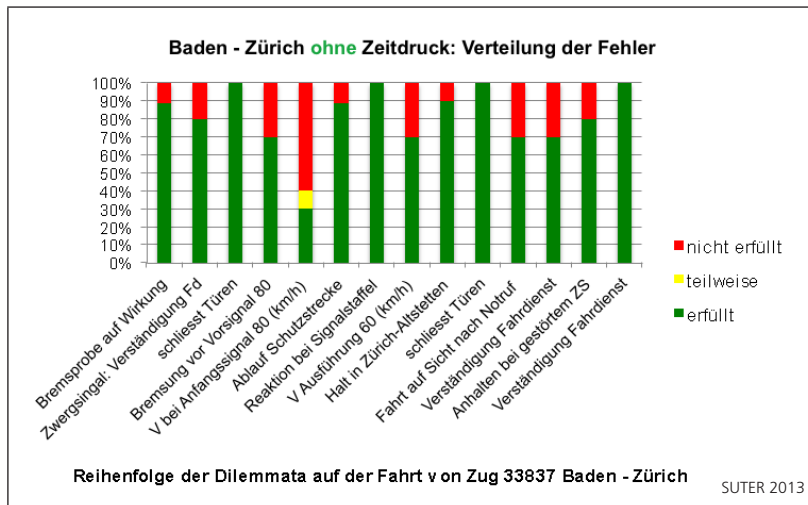


Abbildung 80: Verteilung der Fehler der Probanden, die Zug 33837 von Baden nach Zürich ohne Zeitdruck führen.

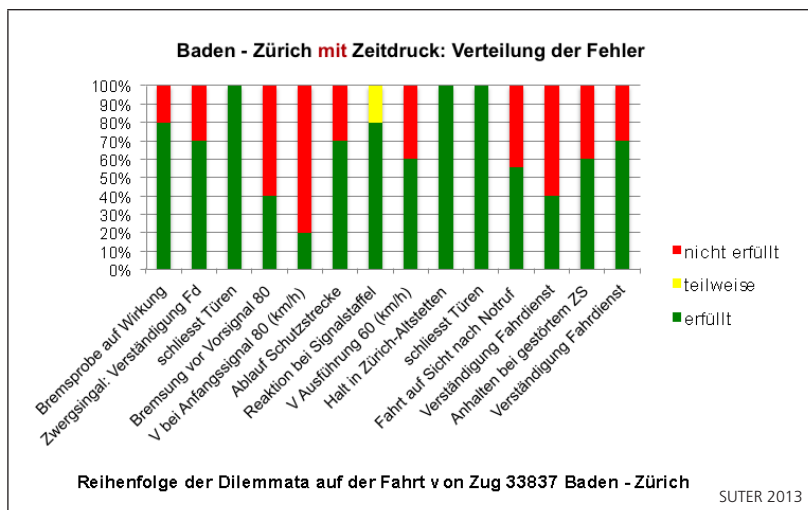


Abbildung 81: Verteilung der Fehler der Probanden mit Zeitdruck. Im Vergleich zu Abb. 79 fällt auf, dass die Fehlerquote rund doppelt so hoch ist. Ähnlich wie bei Szenario A befindet sich die grösste Zunahme der Fehler am Schluss der Fahrt. Dies könnte auch mit steigendem Druck durch die Zunahme der Verspätung begründet werden.

Die Reihenfolge der Szenarien während der Fallstudien und die Zuteilung von Zeitdruck wurden bewusst durchmischt, damit Ermüdungserscheinungen als Ursache für die höhere Fehlerquote bei Szenario B unter Zeitdruck nicht geltend gemacht werden können. Die Unterschiede zwischen den beiden Szenarien konnten bisher nur mit verschiedenen hohen Schwierigkeitsgraden erklärt werden.

Während dem Verlauf dieser Übung waren zudem zwei Extremsituationen eingebaut. Zwischen den Bahnhöfen Neuenhof und Killwangen-Spreitenbach trafen die Probanden auf eine vorübergehende Langsamfahrstelle, deren Standort in den vor der Fahrt abgegebenen Unterlagen (Verzeichnis über die Langsamfahrstellen) ersichtlich war. Der Lokführer wurde während der Fahrt zusätzlich durch eine plötzliche auftretende Fahrzeugstörung und eine Schutzstrecke (spannungsloser Abschnitt der Fahrleitung zwischen zwei Speisebezirken) abgelenkt, damit Erkenntnisse über das *Situationsbewusstsein* hinsichtlich dieser Langsamfahrstelle generiert werden konnten (vgl. Tabelle 19, Dilemmata BD4 bis BD6). Auch aus diesen Versuchen geht ein grosser Unterschied zwischen Zügen mit und ohne Zeitdruck hervor. Insgesamt wurde die zulässige Geschwindigkeit von der Mehrheit der Züge überschritten, was hinsichtlich der Bedingungen keine Überraschung darstellt. Offensichtlich konnten nur jene Lokführer ihren Zug rechtzeitig abbremsen, welche sowohl durch ihre Streckenkenntnisse als auch durch eine konkrete Vorstellung über den Standort der Langsamfahrstelle über genügendes Situationsbewusstsein verfügten.

Dieses Ergebnis in Abbildung 82 zeigt auch, dass die klare und einfache *Kommunikation* an den Lokführer hinsichtlich Verständlichkeit einen grossen Einfluss auf das Ergebnis hat. Das Verzeichnis über die Langsamfahrstellen sollte in einer Art und Weise gestaltet werden, dass sich der Lokführer die genauen Standorte der Signale zusammen mit seinen Streckenkenntnissen sofort vorstellen kann. Hinzu kommt die Erfahrung aus der Praxis, wonach Signale im Zusammenhang mit Langsamfahrstellen (Baustellen) oft fehlerhaft oder unvollständig aufgestellt werden. Die Geschwindigkeitsgraphen der Züge unter Zeitdruck (rote Linien) befinden sich wiederum vermehrt im oberen Bereich.

Mittels Langsamfahrstellenverzeichnis hätte der Standort der Signale dem Lokführer bewusst sein sollen. Vor dem Vorsignal zur Langsamfahrstelle ist ein Traktionsausfall mit Anzeige auf dem Diagnosebildschirm aufgetreten. Kurz nach dem Vorsignal zur Langsamfahrstelle begegnete der Lokführer einer permanenten Schutzstrecke. Diese Situation stellte sehr hohe Anforderungen an das Situationsbewusstsein der Lokführer.

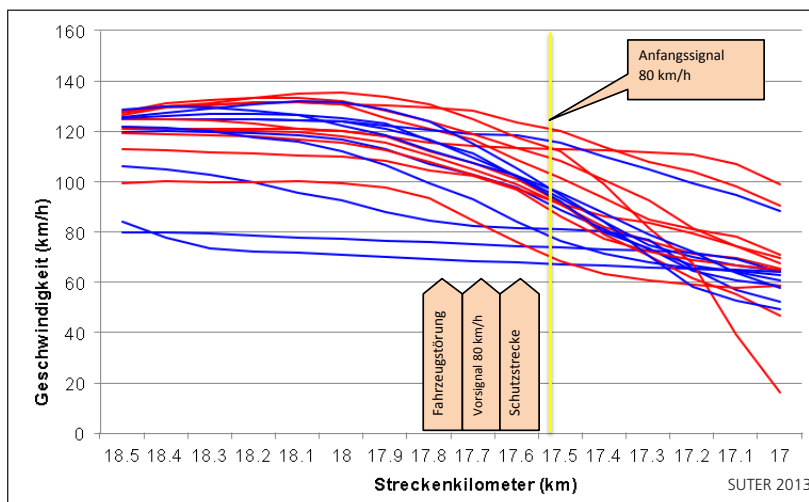


Abbildung 82 (zu Dilemmata BD4 bis BD 6): Geschwindigkeits-Weg-Diagramm im Vorfeld der Langsamfahrstelle (gelbe Linie: Standort Anfangssignal 80 km/h). Ein Traktionsausfall und eine Schutzstrecke haben die Situation zusätzlich erschwert. Die Häufung von Ereignissen kann den Lokführer bei seiner Arbeit beeinträchtigen.

Abbildung 83 und Abbildung 84 zeigen, dass zwischen den Zügen mit und ohne Zeitdruck ein deutlicher Unterschied erkennbar ist. Bei dieser Aufgabe geht es darum, die Auswirkungen von mehreren gleichzeitig auftretenden Einflussgrössen zu untersuchen. Es gilt jedoch zu berücksichtigen, dass diese Aufgabe für die Probanden eine Extremsituation darstellte und so nicht ohne weiteres mit der Praxis verglichen werden kann.

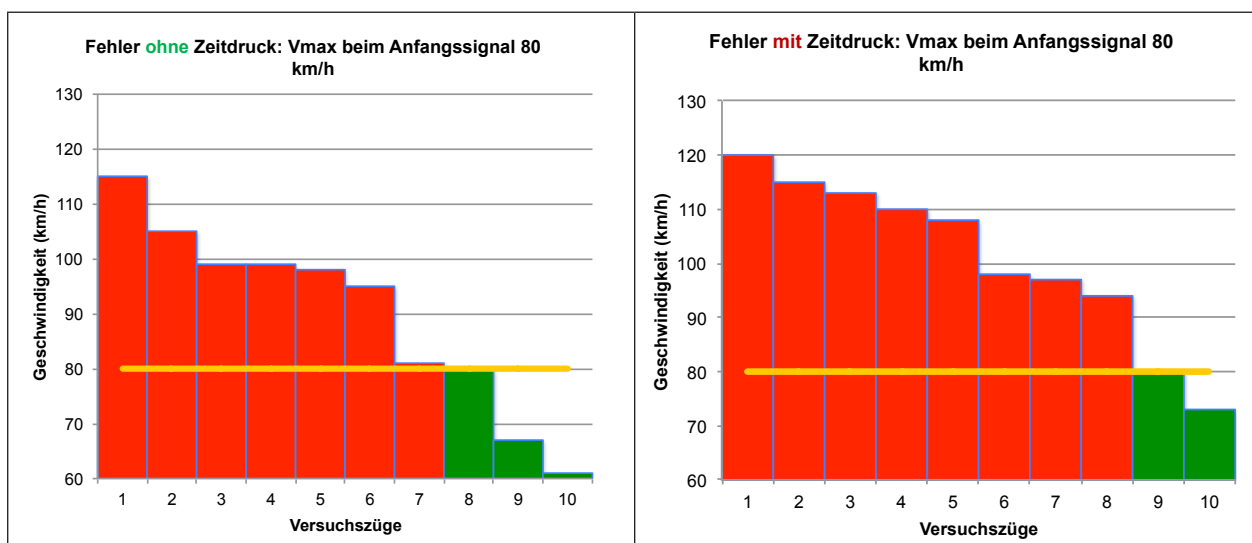


Abbildung 83 und 84: Vergleich der IST-Geschwindigkeiten aller Versuchszüge bei der Vorbeifahrt am Anfangssignal der Langsamfahrstelle 80 km/h.

Die zweite Extremsituation befand sich zwischen den Bahnhöfen Schlieren und Zürich-Altstetten, wo eine Geschwindigkeitsermässigung auf einem unzulässig kurzen Bremsweg signalisiert wurde (vgl. Tabelle 19, Dilemma BD8). Die Situation befindet sich an der Grenze zum Übergang von Signalsystem L zu Signalsystem N. Das Ausfahrtsignal Typ L in Schlieren zeigte Fahrbegriff 1 (höchste gemäss Streckentabelle erlaubte Geschwindigkeit). Das am gleichen Mast angeordnete Vorsignal Typ L zeigte ebenfalls Fahrbegriff 1. Bei dem folgenden Signal handelte es sich um das Einfahrsvorsignal des Bahnhofs Zürich Altstetten vom Typ N, welches V-Ankündigung 60 km/h zeigte. Diese Konstellation ist nicht zulässig: Das vorangehende Vorsignal bei der Ausfahrt von Schlieren hätte ebenfalls V-Ankündigung 60 km/h (Fahrbegriff 3*) anzeigen sollen. Mit dieser Situation wurde die Aufmerksamkeit der Probanden im Sinne des steigenden Schwierigkeitsgrades überraschend gebunden. Die Lokführer wurden mit einem kurzen Bremsweg zwischen V-Ankündigung und V-Ausführung 60 km/h überrascht. Ihre Aufmerksamkeit wurde dadurch so stark gebunden, dass der fahrplanmässige Halt in Zürich-Altstetten von zwei Probanden beinahe und von einem dritten ganz verpasst wurde (Abbildung 85).

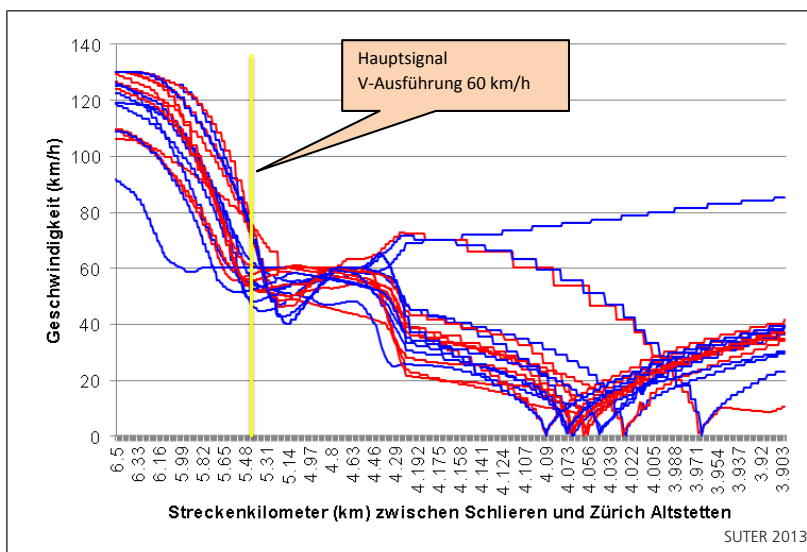


Abbildung 85 (zu Dilemma BD8): Geschwindigkeits-Weg-Diagramm der Strecke zwischen Schlieren und Zürich-Altstetten.

Die Auswertung im Weg-Geschwindigkeits-Diagramm in Abbildung 85 zeigt, dass sich die Mehrheit der Lokführer mit einer Geschwindigkeit von 120 - 130 km/h annäherten und eine starke Bremsung einleiteten, um die vorgeschriebenen 60 km/h beim Hauptsignal zu erreichen. Derjenige Zug, welcher bei der Geschwindigkeitsschwelle mit 73 km/h (statt 60 km/h) die höchste Abweichung aufweist, war zwar mit Zeitdruck unterwegs, weist jedoch eine Annäherungsgeschwindigkeit von lediglich 108 km/h (statt 130 km/h) auf. Der Zug weist auf dem Diagramm eine deutlich geringere Bremswirkung auf, die nicht weiter zu erklären ist. Statistisch gesehen könnte diese Zugfahrt als Ausreisser betrachtet werden, womit in dieser Situation keine signifikanten Unterschiede zwischen Lokführerverhalten mit und ohne Zeitdruck ausgewiesen werden kann. Interessant ist der Fahrtverlauf nach dem Signal mit V-Ausführung 60 km/h. Nur wenige Züge erreichen eine Geschwindigkeit von genau 60 km/h ein, sondern heben die Bremswirkung erst im Bereich von 40 - 50 km/h auf, um anschliessend wieder zu beschleunigen. Dies ist ein Hinweis auf die überraschend starke Betätigung der Bremsen durch den Lokführer. Es kann davon ausgegangen werden, dass ein solches Ereignis die Konzentration des Lokführers in hohem Masse beeinträchtigt. Dies könnte auch den Umstand erklären, dass der anschliessende Halt am Bahnhof Zürich Altstetten von zwei Lokführern beinahe und von einem Lokführer gar ganz verpasst wurde.

Der Vergleich der Geschwindigkeitsüberschreitung zwischen Zügen mit und ohne Zeitdruck bringt hier keinen signifikanten Unterschied zu Tage (s. Abbildung 86 und Abbildung 87). Es kann angenommen werden, dass die Extremsituation des kurzen Bremswegs bis zur Geschwin-

digkeitsschwelle die zuvor festgestellten Unterschiede im Verhalten von Lokführer mit und ohne Zeitdruck ausgleicht.

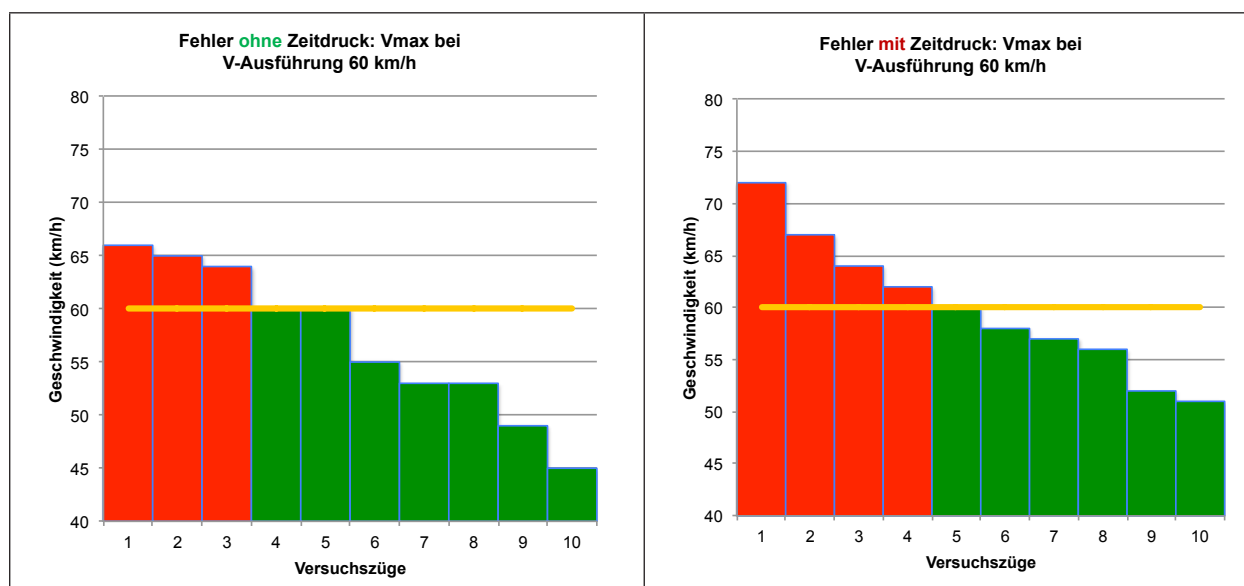


Abbildung 86 und 87 (zu Dilemma BD8): Vergleich der IST-Geschwindigkeiten aller Versuchszüge bei der Vorbeifahrt am Einfahrsignal in Zürich-Altstetten, welches V-Ausführung 60 km/h zeigte. Die Vorsignalisierung im Zusammenhang mit dem Übergang von Signalsystem L zu Signalsystem N war nicht korrekt.

An dieser Stelle sei die Aussage der Armeeinstruktoren WÜTHRICH und HAUSAMMANN (mündliche Stellungnahme vom 23. Januar 2014) erwähnt, die am Beispiel von länger dauernden Übungen auf den Simulatoren feststellt, dass die Reaktionen der Teilnehmer stark von der Belastung abhängig ist. Wenn man daraus schliessen kann, dass die Qualität des Verhaltens proportional von der Belastung abhängt, könnte man dem Überraschungseffekt des kurzen Bremswegs auch eine positive Wirkung zugestehen. In der ersten Extremsituation ging diese Wirkung (Spannung) vermutlich durch die Überlagerung zu vieler Dilemmata in eine Überforderung über.

Im Raum Zürich-Hardbrücke wurde die Aufmerksamkeit der Lokführer erneut gebunden, indem sie einen unklaren Notruf über den Zugfunk ZFK 88 erhalten haben (vgl. Tabelle 19, Dilemmata BD11 und BD12). Zusammen mit der Tatsache, dass die Geräte der ZFK 88 heute nicht mehr in Betrieb stehen, galt es für die Probanden, die Situation als unklaren Notruf zu interpretieren und entsprechend zu handeln. Sowohl beim Fahren auf Sicht als auch bezüglich der Kontaktaufnahme mit der Betriebszentrale zeigten sich Unterschiede zwischen den Zügen ohne und jenen unter Zeitdruck: Letztere Fehlerquote beträgt fast das Doppelte (vgl. Abbildung 80 und Abbildung 81).

Im Einfahrbereich des Bahnhofs Zürich HB wurden die Probanden bereits zum zweiten Mal mit einem gestörten Zwergsignal konfrontiert. Diesmal handelte es sich jedoch um die obere Lampe, welche nicht brannte, was für den Lokführer laut Fahrdienstvorschriften Halt bedeutet. Die Lokführer ohne Zeitdruck reagierten zu 80% richtig, jene mit Zeitdruck zu 60%. Diese Situation betrifft eine Vorschrift, welche in der Praxis diskutiert wird. Macht es Sinn, in voller Fahrt wegen einem Signal für den Rangierverkehr eine Schnellbremsung auszulösen, wenn die Zugfahrstrasse offensichtlich gesichert ist? Beim bereits mehrmals zitierten Ereignis im Bahnhof Thun am 24.11.2011 konnte jedoch u.a. durch das Beobachten eines solchen Zwergsignal ein folgenschwerer Zusammenstoß verhindert werden.

5.1.6 Fazit zu den Fallstudien

Auf Grund der heterogenen Beschaffenheit jeder Eisenbahnstrecke und der daraus resultierenden Vielfalt an Einflussgrößen gestaltet sich das Ausarbeiten einer Übung auf dem Simulator mit linear zunehmendem Schwierigkeitsgrad als anspruchsvoll. Dazu kommt, dass die Messbarkeit der verschiedenen Dilemmata mangels fehlender Messwerte oft nur qualitativ möglich ist. So zum Beispiel kann eine zeitgerechte und vollständige Meldung nur durch Fachexperten am Regiepult des Simulator beobachtet und beurteilt werden.

Abgesehen von den fachlichen Ergebnissen wurde versucht, mit diesen Fallstudien neue, bisher nicht genutzte Möglichkeiten für die Anwendung von Simulatoren zu Forschungszwecken aufzuzeigen. Mit den beiden oben beschriebenen Szenarien wurde angestrebt, sich mit Situationen aus der Praxis, welche Fragen aufwerfen und die nicht einfach auf linearem Weg beantwortet werden können, zu beschäftigen. Wie das Beispiel der Verwechslungsgefahr bei der Anordnung von „Fahrt auf Sicht“ über eine bestimmte Strecke zeigt, ist es unter Verwendung von Simulatoren möglich, bei der Untersuchung komplexer Problemstellungen zumindest einen grossen Teil der relevanten Systemelemente mit ihrem Wirkungsgefüge einzubeziehen.

Die Auswahl der Stichprobe für Fallstudien dieser Art ist von grundlegender Bedeutung. Es kann angenommen werden, dass die in der Schweiz angestellten Lokführer bezüglich ihrem Alter gleichverteilt sind. Demnach müsste - im Gegensatz zum Vorgehen im Rahmen dieser Arbeit - eine nach Altersklassen geschichtete Stichprobe erhoben werden. Der Verteilungstest (χ^2 -Test) zeigt, dass die hier auf der Basis von freiwilligen Lokführern angewendete Stichprobe bezüglich Verteilung nicht repräsentativ ist (vgl. Abbildung 62).

Im Folgenden geht es darum, weitere Aspekte im Zusammenhang mit der Anwendung von Simulatoren zu beleuchten.

MÜLLER (1996: 184) fasst die Betriebsführung im Eisenbahnverkehr als Regelkreis auf, welcher über den Menschen geschlossen wird. Er stellt fest, dass mit zunehmender Geschwindigkeit der Verkehrsmittel und gleichzeitiger Erhöhung der Verkehrsstärke werden die physiologischen und psychologischen Fähigkeiten des Menschen überfordert werden und dadurch die Qualität der Arbeit der Zugverkehrsleiter leidet. Die Mensch-Prozess-Kommunikation soll optimal auf die kognitiven Fähigkeiten des Zugverkehrsleiters abgestimmt werden. Hierzu muss der Mensch als die zentrale Figur der Betriebsführung begriffen werden. Die konzeptionell strukturierte Mensch-Prozess-Kommunikation bildet ein grundlegendes Konzept, welches seitens Zugverkehrsleiter in die Fallstudien mit einbezogen werden sollte.

Bei der Modellierung von Problemstellungen aus der Betriebsführung ist eine Trennung von leistungsbeeinflussenden Faktoren und der resultierenden Zuverlässigkeit des Mensch-Maschine-Systems möglich. Die leistungsbeeinflussenden Faktoren können weiter in physische Faktoren, personelle Faktoren und organisatorische Faktoren unterteilt werden.

Die Planung, Organisation und Durchführung von Fallstudien auf Simulatoren im Forschungslabor sollten auf der Basis dieser leistungsbeeinflussenden Faktoren (s. Tabelle 20) gestaltet werden. Damit ist eine wichtige Voraussetzung geschaffen, mit der Auswertung der Daten präzisere Aussagen über die menschliche Zuverlässigkeit von Lokführern und Zugverkehrsleitern vor dem Hintergrund ihrer Arbeitsbedingungen zu ableiten. (HAMMERL 2011: 91-92)

physische Faktoren	
<ul style="list-style-type: none"> • Antropometrische Gestaltung des Arbeitsplatzes • Arbeitsumweltbedingungen • Anordnung und gebrauchstaugliche Gestaltung der interaktiven Systeme 	
personelle Faktoren	
Individuelle Faktoren	Beeinflussende Faktoren
<ul style="list-style-type: none"> • Alter, Geschlecht • Intelligenz, Bildungsniveau • Gesundheit • Anspannung 	<ul style="list-style-type: none"> • Müdigkeit • Fachwissen (Regel, Strecken- Fahrzeug-/Stellwerkkenntnisse) • Erfahrung • Motivation • Sicherheitsbewusstsein
organisatorische Faktoren	
Mitarbeiterbezogene Faktoren	Grundsätzliche Faktoren
<ul style="list-style-type: none"> • Tages- und Wochendienstplanung • Führungskultur (Lohn, Anerkennung, Organisationsstruktur) • Ausbildung • Training und Weiterbildung • Soziale Bedingungen • Sicherheitskultur 	<ul style="list-style-type: none"> • Arbeitsanweisungen, Richtlinien, Normen • Arbeitsmethoden und Prozeduren

Tabelle 20: Struktur der leistungsbeeinflussenden Faktoren für die Untersuchung der menschlichen Zuverlässigkeit. (Quelle: HAMMERL 2011: 91-92)

5.1.7 Untersuchung der Situation Awareness auf dem Fahrsimulator

STOLLER (2013: 22ff) hat in ihrer Arbeit anhand von Fallstudien auf dem Fahrsimulator FASI der Re 460 (vgl. Abschnitt 2.8.2) die Situation Awareness von 20 Lokführern untersucht. Bei der Auswahl der freiwilligen Lokführer wurde auf eine möglichst grosse Vielfalt von Altersklassen und Berufserfahrung geachtet. Die Probanden führten je einen Reiseextrazug von Olten nach Brugg und von Baden nach Zürich. Jede Fahrt enthielt 11 sogenannte SA-Stufen, welche in Form von Dilemmata durch die Fachpersonen zu beobachten und bewerten waren. Als Stressfaktor wurde Zeitdruck ausgewählt, indem jeder Lokführer eine der zwei Fahrten unter Zeitdruck zu absolvieren hatte. Dadurch entstanden die experimentelle Bedingungen gemäss Tabelle 21.

	Zug 33835 Olten - Brugg	Zug 33837 Baden - Zürich HB
10 Probanden: Gruppe 1	ohne Zeitdruck	mit Zeitdruck
10 Probanden: Gruppe 2	mit Zeitdruck	ohne Zeitdruck

Tabelle 21: Einteilung der Probanden in zwei Gruppen für die Datenerhebung mittels SA-Performanz und SA-Selbsteinschätzung. (Quelle: STOLLER 2013: 26, abgeändert)

Um in der Stichprobe ein Muster im Sinne eines Lerneffekts zu verhindern, wurde zudem die Reihenfolge der zu absolvierenden Fahrten selektiv vorgesehen, woraus vier Gruppen von Lokführern entstanden. Die Reihenfolge der absolvierten Fahrten hat im Gegensatz zur Bedingung bezüglich Zeitdruck keinen Einfluss auf die statistische Auswertung. Pro Versuchsperson werden die SA-Performanzwerte mittels Beobachtung durch Fachpersonen erhoben und in einem vorbereiteten Fragebogen eingetragen. Unmittelbar nach der Fahrt nimmt der Lokführer eine subjektive SA-Selbsteinschätzung vor, wobei ein Fragebogen der Situation Awareness Rating Technique (SART) mit jeweils sieben Bewertungsstufen pro Frage angewendet wird. Diese SART-Fragebogen, welche

ursprünglich für den Flugverkehr entwickelt wurden, enthalten Fragen über die Beurteilung der Fahrt (erforderliche Aufmerksamkeit), die Beurteilung der eigenen Verfassung (vorhandene Aufmerksamkeit) sowie über das Verständnis der erlebten Situation. Der Gesamtwert der subjektiven Selbsteinschätzung errechnet sich, indem die einzelnen Werte über die erforderliche Aufmerksamkeit aufsummiert und von der Summe der einzelnen Werte über die vorhandene Aufmerksamkeit und das Verständnis der Situation abgezogen wird. Daraus entsteht ein Gesamtwert zwischen minus 14 (sehr schlechte SA-Selbsteinschätzung) und 46 (sehr gute SA-Selbsteinschätzung). Die Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Performanz und Selbsteinschätzung hat ergeben, dass bei den Fahrten unter Zeitdruck ein Zusammenhang zwischen der objektiven, beobachteten SA-Performanz und der subjektiven Selbsteinschätzung festzustellen ist, nicht so hingegen bei Fahrten ohne Zeitdruck.

Die Korrelation zwischen Performanz und Selbsteinschätzung ist in Fachkreisen umstritten, da eine Person nicht beurteilen könne, was sie nicht weiss. (ENDSLEY 1998: 5) Hinsichtlich der Performanz hat STOLLER (2013: 32ff) Unterschiede bei den Performanz-Mittelwerte zwischen den zwei Gruppen von Probanden und gleichzeitig eine signifikante Interaktion zwischen Zeitdruck und Gruppe festgestellt. Demnach lässt sich der Faktor Zeitdruck nicht generell interpretieren. Jeweils gegen Ende der Versuche (SA-Stufen 8 bis 11) ist der Zeitdruck als Haupteffekt signifikant erkennbar, ein möglicher Hinweis darauf, dass die Komplexität der Szenarien genügend gross sein muss, dass sich der Zeitdruck bemerkbar macht. Dies könnte auf die Yerkes-Dodson-Kurve (s. Abbildung 8) zurück geführt werden. Zudem ist der Zeitdruck im Verlauf der Fahrt nicht konstant, sondern nimmt infolge zusätzlicher Verspätung zu. Bei der Selbsteinschätzung mittels SART-Fragebogen kann hingegen kein Einfluss von Zeitdruck festgestellt werden. Den Untersuchungen von Performanz und Selbsteinschätzung mittels SART sind Grenzen gesetzt. So zum Beispiel wird bei der Performanz nicht die Situations Awareness an sich, sondern die daraus hervor gehende Handlung erfasst. Die Selbsteinschätzung ist deshalb schwierig, da man nicht beurteilen kann, was man *nicht* weiss. Dennoch hat Nicole Stoller mit ihrer Arbeit neue Erkenntnisse über die Anwendung von Methoden generiert, welche ohne Simulator nicht zu Stande gekommen wären. STOLLER (2013: 36) gibt für Nachfolgeprojekte folgende Empfehlungen ab:

- Erhöhung der Stichprobengrösse zur Verstärkung der statistischen Aussage,
- Prüfung weiterer Variablen, welche die SA beeinflussen könnten wie z. B. Arbeitserfahrung, Training in Sicherheitsthemen, Alter usw.,
- Quantitative Datenauswertung der einzelnen Kategorien des SART-Fragebogen,
- Quantitative Auswertung der einzelnen, durchlaufenen SA-Stufen der Szenarien,
- Qualitative Auswertung der durchlaufenen SA-Stufen.

Die Arbeit von Nicole Stoller kommt zum Schluss, dass Situation Awareness bei sicherheitsrelevanten Berufen der Bahn eine wichtige Rolle spielt. Sie weist auf Grossbritannien hin, wo der Erfolg von Situation Awareness-Trainings nachgewiesen werden konnte. Im SA-Modell von Endsley sind die Einflussfaktoren auf die Situation Awareness aufgezeigt, welche für Verbesserungsmassnahmen grundsätzlich alle in Betracht gezogen werden können.

HAMMERL (2011: 89) zeigt drei Kategorien von Einflussfaktoren auf, welche in veränderliche und abhängige Variablen aufgeteilt werden können:

- Physische Einflussfaktoren
- Persönliche Einflussfaktoren
- Organisatorische Einflussfaktoren

Dieses Modell erlaubt die Unterscheidung zwischen Umgebungsfaktoren und dem diesbezüglichen reaktiven Kern des Arbeitssystems. Es bietet eine Entzerrung der leistungsbeeinflussenden Faktoren bietet. Damit werden komplexe Abhängigkeiten zwischen den Umgebungsfaktoren untereinander aufgelöst und der Umgang für die Handhabung vereinfacht. Es soll unterschieden werden zwischen „Stellschrauben“, mit welchen die Leistungsfähigkeit des Mensch-Maschine-Systems verändert werden kann, sowie Größen, die von aussen nicht direkt beeinflusst werden können. Weiter Vereinfachungen erlauben es, mit diesem Modell eine Ursache-Wirkungs-Beziehung darzustellen.

Die Untersuchungen der Situation Awareness stehen der Analytik der Mensch-Barrieren-Interaktion von HAMMERL (2011: 179ff) gegenüber, mit welcher die menschliche Zuverlässigkeit insbesondere von Eisenbahnpersonal qualitativ bewertet werden kann. Dabei werden Sicherheitsvorkehrungen als Barrieren in einem Mensch-Maschinen-System modelliert. Dabei muss die Komplexität des menschlichen Verhaltens in einer bestimmten Situation auf richtige bzw. falsche Ausführungen reduziert werden, was oft eine schwierige Aufgabe darstellt. Es wäre durchaus interessant, die Ergebnisse aus der Analyse der Mensch-Barrieren-Interaktion bei weiteren Fallstudien den Resultaten aus den Untersuchungen mit dem SA-Modell gegenüber stellen zu können.

5.2 Weitere Erkenntnisse und Anwendungsmöglichkeiten

Die im Umfeld der in Abschnitt 5.1 erläuterten Fallstudien mit Lokführern erhobenen qualitativen Daten geben Aufschluss zu Themen, über welche oft Hypothesen, nicht jedoch die entsprechenden Nachweise bestehen. Qualitativ erhobene Daten können einen wichtigen Beitrag leisten, um einerseits Problemstellungen, Zielsetzungen und Hypothesen von Untersuchungen aufstellen, zu plausibilisieren und überarbeiten, andererseits geben sie wertvolle Impulse für vertiefte Untersuchungen. Nachstehend werden die Ergebnisse aus den Fragebogen zu Ergonomie, betrieblicher Lenkung, Personalfriedenheit und Gefahren Themen vorgestellt, welche die Lokführer im Rahmen der Fallstudien zu folgenden Themen bearbeitet haben (s. Anhang).

5.2.1 Ergonomie

Im Bezug auf die Ergonomie wurden Daten über die subjektive Bewertung von Arbeitsplätzen auf Triebfahrzeugtypen durch die Lokführer erhoben. Die Ergebnisse liefern wichtige Rückschlüsse für den Einsatz von Simulatoren, da mit spezifischen Szenarien das Verhalten von Lokführern auf verschiedenen Führerstandstypen untersucht werden kann.

Die Grafik in Abbildung 88 zeigt, dass die Führerstände vom Typ Re 460/465 aus ergonomischer Sicht am meisten Zustimmung erhalten. An zweiter Stelle stehen die modernen Führerstände der Typen Re 482, 485 und 486, welche auf dem europäischen Einheitsführerstand basieren. Interessanterweise folgt an dritter Stelle ein Führerstand, welcher bereits vor 30 Jahren entwickelt worden ist und steht damit in der Bewertung noch vor modernen Nahverkehrszügen, die gegenwärtig abgeliefert werden. Der vor rund 60 Jahren entwickelte Einheitsführerstand, welcher heute noch zahlreich in Betrieb ist, steht an drittletzter Stelle. Am Schluss der Bewertung erscheint erstaunlicherweise ein moderner Nahverkehrszug, welcher vor rund 15 Jahren erstmals in Betrieb gesetzt und heute noch gebaut wird. Insgesamt kann festgestellt werden, dass sich die Rangliste der Bewertung von Führerständen durch die Lokführer etwa proportional zum Alter des Triebfahrzeugs verhält. Ausnahmen bilden die bereits 30-jährigen Triebwagen der Serien RBDe 565, 566 II (BLS) sowie die Triebzüge von Bombardier (RABe 525, 535) aus den Jahren 1998 - 2012.

Die künftig einheitliche Gestaltung der Führerstände verringert nicht nur den Ausbildungsaufwand, sondern erhöht auch die Sicherheit durch geringere Unterschiede in der Bedienung durch die Lokführer. (HECHT/JÄNSCH/LANG/LÜBKE et. al., 2008: 464)

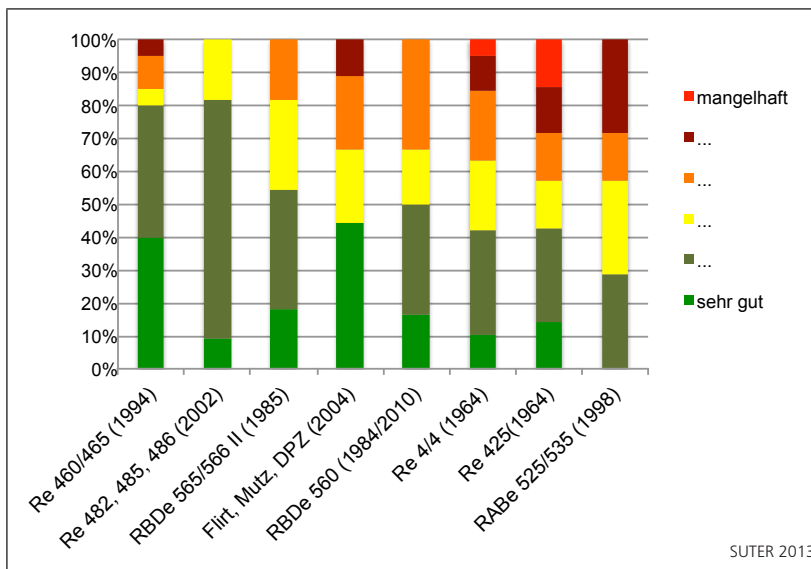


Abbildung 88 (s.a. Fragebogen Q4.1 im Anhang, Frage 1): Beurteilung der Arbeitsplätze verschiedener Triebfahrzeugtypen durch die Lokführer (in Klammer steht das Baujahr der entsprechenden Triebfahrzeuge).

5.2.2 Betriebliche Lenkung

Unter betrieblicher Lenkung versteht man eine optimierte Form der Betriebsführung, mit welcher versucht wird, mittels Geschwindigkeitsempfehlungen an den Lokführer in Echtzeit Konflikte von Zügen zu vermeiden. Bei den SBB kommen täglich rund 2'000 Züge unvorhergesehen vor Halt zeigenden Signalen zum Stillstand oder werden gebremst. (VÖLCKER, 2012: 9) Wenn die Fahrzeiten der einzelnen Züge so optimiert werden können, dass sie anstelle der höchst erlaubten Geschwindigkeit mit einer berechneten Idealgeschwindigkeit fahren, können Signalhalte vermieden werden. Es liegt auf der Hand, dass dies sowohl ökonomische als auch ökologische Vorteile hat.

Gemäss WEGELE (2005: 104f) stellt die Basis für die Optimierung der Eingriffe durch die Zugverkehrsleiter ein Prozessmodell dar, welches die Zieldefinition, das Systemmodell und die Kodierung enthält. Das Ziel wird als Funktional in Form einer Straffunktion für Verspätungen, Gleiswechsel und verpasste Anschlüsse definiert. Ein simulationsbasiertes Modell kann das Systemverhalten mit der gleichen Genauigkeit voraussagen, wie bereits existierende Werkzeuge für Offline-Planungsaufgaben (z.B. Jahresfahrplan).

Die Anwendung der betrieblichen Lenkung wird jedoch für den Lokführer eine zusätzliche Aufgabe geschaffen: Er muss die Geschwindigkeitsempfehlungen laufend beachten und umsetzen. Vor diesem Hintergrund interessiert die Wahrnehmung der betrieblichen Lenkung, die erstmals im Jahr 2012 eingeführt wurde, aus Sicht der Lokführer (Abbildung 89). Bisher erfolgt die betriebliche Lenkung noch nicht mittels empfohlener Verkehrszeiten. Dies kann mit ein Grund für die deutlich schlechtere Bewertung dieser Form der betrieblichen Lenkung sein. Insgesamt stösst die betriebliche Lenkung mittels empfohlener Geschwindigkeiten auf Zustimmung.

Die neuen Massnahmen der betrieblichen Lenkung können als zusätzliche Belastung des Lokführers gewertet werden. Die Ergebnisse aus der Befragung der Lokführer in Abbildung 89 zeigen, dass die neuen empfohlenen Geschwindigkeiten mehrheitlich als nützlich empfunden werden. Etwas weniger trifft dies bei empfohlenen Verkehrszeiten zu, welche z.B. im elektronischen Dienstfahrplan zur Anwendung kommen könnten. Diese Form der betrieblichen Lenkung kommt jedoch in der Praxis noch nicht zur Anwendung.

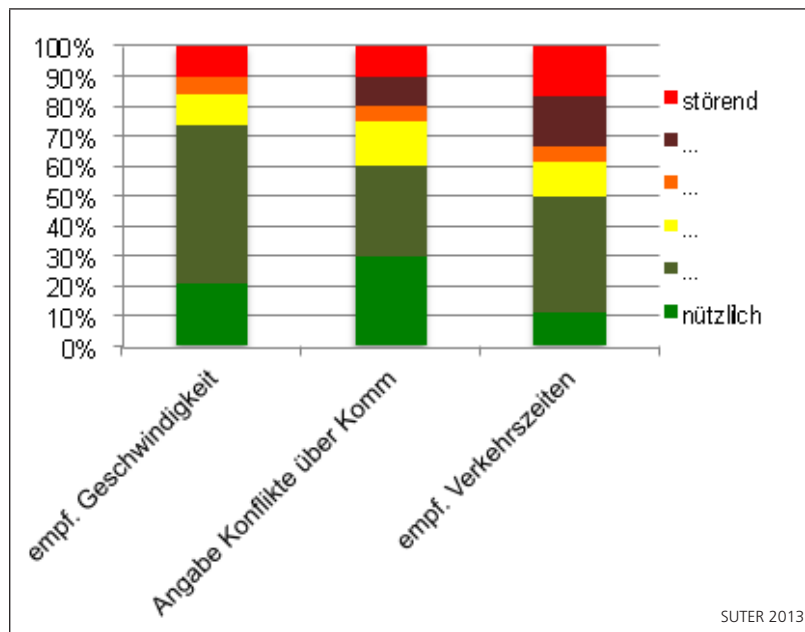


Abbildung 89 (s.a. Fragebogen Q4.1 im Anhang, Frage 2):
Beurteilung von Formen betrieblicher Lenkung durch die Lokführer.

Die Grafik in Abbildung 90 zeigt, dass die betriebliche Lenkung nach Einschätzung durch die Lokführer die Häufigkeit des Antreffens von Halt zeigenden Signalen reduzieren kann. Auf der anderen Seite wird die Belastung der Lokführer durch zusätzliches Beachten der empfohlenen Geschwindigkeiten auch als störend empfunden. Aus Sicht der Lokführer wird der Nutzen bezüglich ökonomischer und ökologischer Fahrweise höher bewertet als die Verbesserungen bezüglich dem Gewähren von Anschlüssen in Übergangsbahnhöfen. Die Bewertung der Verständlichkeit bei der Anwendung der betrieblichen Lenkung bringt ebenfalls noch Verbesserungspotential zu Tage. Dabei kann davon ausgegangen werden, dass sich dieses vor kurzer Zeit eingeführte und noch in Entwicklung befindende Verfahren erst etablieren und in der Praxis erst noch bewähren muss.

Das Argument des Verhinderung von Signalhalten findet bei der betrieblichen Lenkung die höchste Zustimmung. Eine ganz ähnliche Bewertung erhält das Argument der effizienten Fahrweise. Viele Lokführer machen jedoch auch die zusätzliche Belastung durch die zu beachtenden empfohlenen Geschwindigkeiten geltend

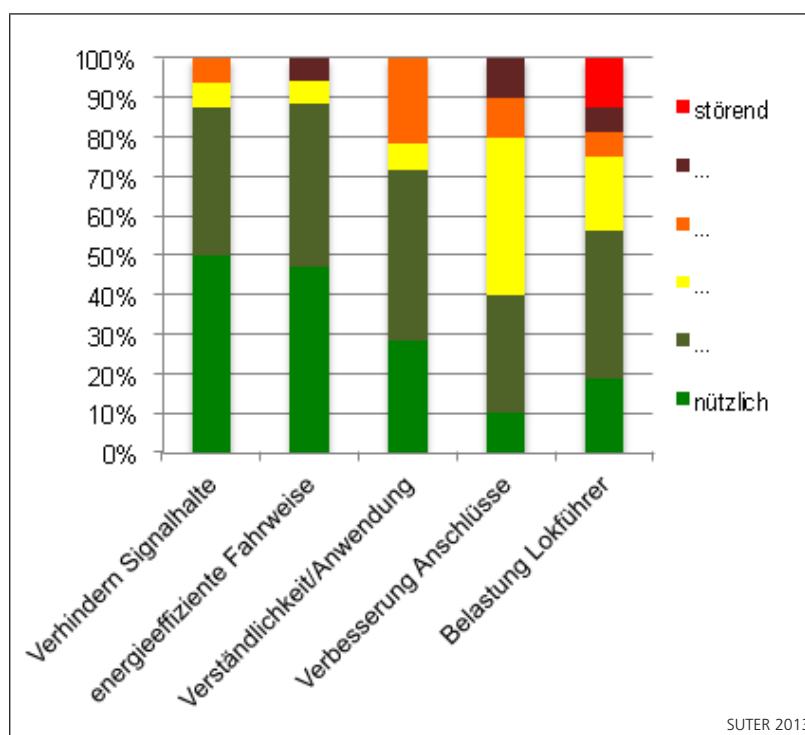


Abbildung 90 (s.a. Fragebogen Q4.1 im Anhang, Frage 3):
Beurteilung des Nutzens betrieblicher Lenkung durch die Lokführer.

5.2.3 Personalzufriedenheit

Ein Teil der qualitativen Datenerhebung befasst sich mit den Auswirkungen der Personalzufriedenheit auf die Arbeit der Lokführer. Aus den Resultaten lässt sich der Schluss ziehen, dass unzufriedene Lokführer in ähnlichem Masse bei ihrer Arbeit beeinträchtigt werden können, wie dies bei den Fallstudien der Faktor des Zeitdrucks gezeigt hat.

Die Bewertung der Personalzufriedenheit im jeweiligen Umfeld der Probanden zeigt ein differenziertes Bild. Die Bewertung erfolgte mittels Schulnoten, wonach die Hälfte die Zufriedenheit als genügend einstuft. Ein Viertel der Probanden bewertet die Zufriedenheit als ungenügend. Die positive Extremnote (6) wurde nicht genannt, der Notendurchschnitt beträgt 3.7 (Abbildung 91).

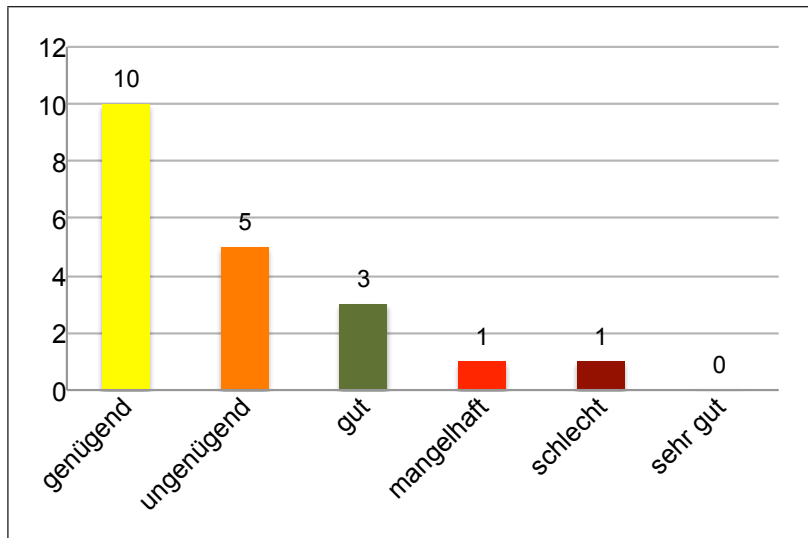


Abbildung 91 (s.a. Fragebogen Q4.1 im Anhang, Frage 5): Bewertung der Personalzufriedenheit aus Sicht der Probanden nach Skala der schweizerischen Schulnoten:

6: sehr gut

5: gut

4: genügend

3: ungenügend

2: mangelhaft

1: schlecht

Abbildung 92 zeigt, dass über 30% der befragten Lokführer den Einfluss ihrer Zufriedenheit auf Fehlhandlungen eher hoch bis sehr hoch einschätzen. Hinsichtlich Konzentration kommen rund 20% der befragten Lokführer auf diese Einschätzung. Die Kriterien der Aufmerksamkeit und Fehlentscheidungen erhalten etwas weniger negative Bewertungen.

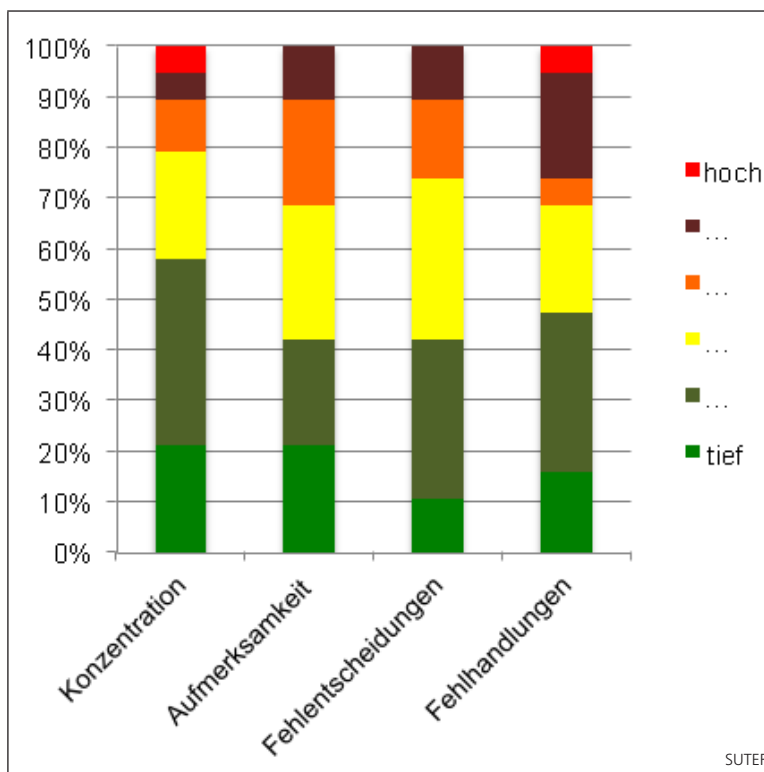


Abbildung 92 (s.a. Fragebogen Q4.1 im Anhang, Frage 4): Die grafische Auswertung zeigt die Einschätzung durch die Lokführer über die Beeinträchtigung ihrer Arbeit durch Unzufriedenheit. Nach diesen Aussagen müsste die Fehlerquote mit steigender Zufriedenheit abnehmen.

Betrachtet man die Arbeit des Lokführers als Prozess von Wahrnehmungen, Entscheidungen und Handlungen, kann man dem Ergebnis der Befragung entnehmen, dass sich die am meisten schädliche Einwirkung von fehlender Zufriedenheit auf dem Weg zwischen Entscheidung und Handlung befindet. In einem abstrakten Beispiel ausgedrückt könnte man eine solche Annahme demnach gemäss der folgenden Tabelle 22 skizzieren.

Warnung zeigendes Vorsignal und Annäherung an ein Halt zeigendes Hauptsignal	Durchschnitts- note	Fehlerwahr- scheinlichkeit
falsche Wahrnehmung des Vorsignals (<i>Aufmerksamkeit</i>)	4,2	mittel
falsche Interpretation und Entscheidung (<i>Fehlentscheidungen</i>): weiterfahren	4,2	mittel
falsche Handlung (<i>Fehlhandlung</i>): nicht oder falsch bremsen	4,0	erhöht

SUTER 2014

Tabelle 22: Abstraktes Beispiel für die Analyse des Prozesses Wahrnehmung, Entscheidung, Handlung bei der Annäherung an ein Halt zeigendes Hauptsignal nach der Vorbeifahrt an einem Warnung zeigenden Vorsignal.

Diese Annahme kann nicht mit der Verteilung von Fehlerursachen bezüglich der SA-Ebenen Wahrnehmung, Verständnis und Vorhersage nach JONES/ENDSLEY (1996) verglichen werden, wonach über 75% der SA-Fehler der ersten Ebene zugeschrieben werden. (STOLLER 2013: 5) Ausgehend von den Ergebnissen dieser Selbsteinschätzung und der SA-Theorie könnte die Fragestellung weiter vertieft werden, indem die Korrelation zwischen den Angaben über die Zufriedenheit und die im Verlauf der Fallstudien ereigneten Fehlhandlungen durch die betroffenen Lokführer untersucht würde.

Methodisch gesehen zeigt das oben beschriebene Vorgehen eine weitere Anwendungsmöglichkeit von Simulatoren auf, indem aus qualitativ erhobenen Daten Hypothesen statistisch getestet werden können, indem entsprechende Szenarien so oft wie nötig wiederholt werden.

5.2.4 Gefahrenthemen

Eine weitere Datenerhebung bei den Lokführern befasste sich mit Gefahrenthemen, welche aus der täglichen Praxis im Eisenbahnbetrieb und aus der Häufung von Ereignissen bekannt geworden sind. Den Lokführern wurde die Sicherheitsrelevanz von insgesamt neun Themen, welche sie aus ihrer täglichen Arbeit kennen, zur Bewertung aus ihrer Sicht unterbreitet.

Die Bewertung der Gefahrenthemen durch die Lokführer ist in Abbildung 93 dargestellt. Die aus der Erfahrung der Lokführer gegenwärtig als am gefährlichsten bewerteten Themen betreffen den Unterhalt von Fahrzeugen, die Missverständnisse bei der Übermittlung, das Verwechseln von Signalen (in einer Signalstaffel), Gruppensignale sowie Umfang und Komplexität der Regelwerke. Die Frage zur der ZUB-Ausrüstung (Zugbeeinflussung: Überwachung der Bremskurve vor Hauptsignalen) wurde offensichtlich missverständlich formuliert, womit eher die ZUB als System und nicht wie beabsichtigt der Stand der Ausrüstung von Signalen mit ZUB bewertet wurde.

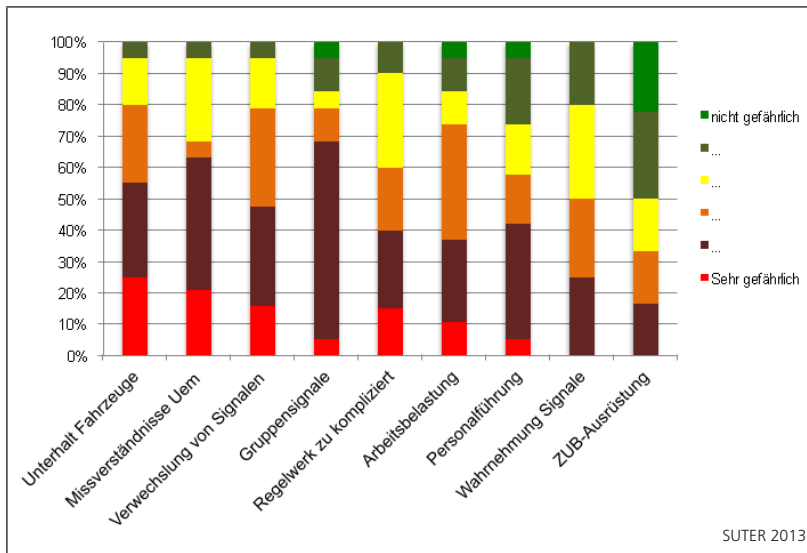


Abbildung 93 (s.a. Fragebogen Q4.1 im Anhang, Frage 6): Die Bewertung von vorgegebenen und bekannten Gefahrenthemen durch die Lokführer.

Im Jahr 2013 sind in der Schweiz immerhin zwei ernsthafte Unfälle zu verzeichnen (am 10.01.2013 in Neuhausen am Rheinfluss und am 29.07.2013 in Granges-Marnand), bei welchen unter anderem jeweils die fehlenden ZUB-Ausrüstungen geltend gemacht werden.

Die insgesamt recht unterschiedliche Bewertung der Gefahrenthemen durch die Lokführer zeigt, dass die subjektive Wahrnehmung an einen Mustervorrat, welcher durch Lernen und Erfahrung zu Stande kommt, gebunden ist. So zum Beispiel wird die Thematik der Gruppensignale, welche im Abschnitt 3.1 am Beispiel einer Zuggefährdung in Thun vom 24.11.2011 vorgestellt wurde, sehr unterschiedlich bewertet. Obwohl das Thema von immerhin gegen 80% der befragten Lokführer als eher gefährlich bis sehr gefährlich eingestuft wird, gibt es auf der anderen Seite auch Lokführer, die darin keine Gefahr sehen. Die Mehrdeutigkeit kann daher kommen, dass ein Thema mit mehreren Mustern assoziiert werden kann. (NINCK/BÜRKI/HUNGERBÜHLER/MÜHLEMANN, 2004: 24) Auch auf der Basis dieser Ergebnisse können gezielt Szenarien ausgearbeitet werden, mit welchen sich unter Anwendung von Simulatoren neue Erkenntnisse generieren lassen. Ferner zeigt das Ergebnis der Umfrage die Bedeutung von Aus- und Weiterbildung sowie des Austausches von Informationen über Ereignisse im Sinne der Unfallprävention. Die Ergebnisse aus der qualitativen Datenerhebung können allenfalls für die Plausibilisierung von statistischen Risikobewertungen herbei gezogen werden.

5.3 Fazit über den Einsatz von Simulatoren

Am Beispiel der im Abschnitt 5.1 vorgestellten Ergebnisse aus den Fallstudien mit Lokführern auf dem Fahr Simulator vom Typ Re 460 FASI konnten drei Verfahren aufgezeigt werden, mit welchen die für Untersuchungen benötigten Daten erhoben werden können:

- Quantitative Datenerhebung: Messung der Parametern durch die Simulationsprogramme,
- Empirische Datenerhebung durch Beobachten,
- Qualitative Datenerhebung mittels Befragung der Lokführer.

5.3.1 Möglichkeiten für das Erheben von Daten

Durch die Simulationsprogramme wurden umfangreiche Daten aufgezeichnet, welche mit statistischen Methoden ausgewertet werden können. Daten über Verhalten und Reaktionen von Lokführern können zusätzlich zu den quantitativ mit den Simulatoren erhobenen Daten auf em-

pirischem Weg erfasst werden. Unter Verwendung von vorbereiteten strukturierten Fragebogen und Beobachtung durch Experten zählt diese Form der Datenerhebung ebenfalls zu den quantitativen Methoden. Qualitative Datenerhebung bei den Probanden können einerseits im Vorfeld von Versuchen für die Entwicklung der detaillierten Untersuchungsgegenstände verwendet werden. Andererseits werden Erkenntnisse aus qualitativen Datenerhebungen für die Plausibilisierung von Untersuchungsergebnissen sowie den Hypothesentest verwendet.

Am Beispiel der qualitativen Datenerhebungen zu den Themen Ergonomie, Zufriedenheit und Beurteilung von Gefahrenthemen konnte die Machbarkeit aufgezeigt werden, auf dieser Basis Szenarien für Untersuchungen auf Simulatoren auszuarbeiten. Auf diese Weise können mittels Simulatoren Erkenntnisse beispielsweise über den sicherheitsrelevanten Einfluss der Zufriedenheit am Arbeitsplatz auf Fehlhandlungen gewonnen werden, welche auf linearem Weg nicht zu generieren sind. Voraussetzung dazu ist eine genügend grosse Stichprobe.

5.3.2 Interaktionen Mensch-Maschine

Nebst der Analyse von Unfällen und Ereignissen können spezifische Aspekte von Mensch-Maschine-Interaktionen mit Simulatorstudien systematisch untersucht werden. Die Schwierigkeit dabei ist, dass aus den Versuchen mit Simulatoren normalerweise keine Wahrscheinlichkeiten sondern nur Häufigkeiten von Stichproben ausgewiesen werden können. Dieser Nachteil kann jedoch kompensiert werden, indem man Simulatorstudien mit Ereignisdaten kombiniert, um mit einer kognitiven Koppelung eine gemeinsame qualitative Basis zu schaffen. Ein Sicherheitsnachweis eines komplexen Systems muss menschliche Handlungen und Wechselwirkungen zwischen Mensch und Technik abbilden. (STRÄTER/ARENIUS 2012: 18-19) An dieser Stelle gilt es zu erwähnen, dass die allgemeine Anwendung des bekannten Werts von 10^{-3} für den menschlichen Fehler nicht zu empfehlen ist, da bei Fehlhandlungen eine deutlich grössere Streuung und Komplexität zu beobachten ist als bei Ausfällen technischer Komponenten. (SCHWARTZ/HAMMERL/FELDMANN 2009: 20)

5.3.3 Akzeptanz der Simulatoren

Aus dem Einsatz der Simulatoren im Forschungslabor konnten auch weitere Erkenntnisse über die Akzeptanz und deren möglichen Grenzen gewonnen werden. Obwohl im Abschnitt 4.12 festgestellt wurde, dass die Simulatoren zu Untersuchungszwecken möglichst realitätsnah gestaltet sein müssen, sind sich die Probanden stets bewusst, dass sie intensiv beobachtet werden und dass ihr Verhalten mehrfach auf verschiedene Art aufgezeichnet wird. Als einer der wichtigsten Einflussfaktoren bezüglich grundsätzlicher Akzeptanz für die Anwendung von Simulatoren in der Forschung können der verantwortungsvolle Umgang mit den Daten genannt werden.

Insbesondere im Zusammenhang mit Fehlhandlungen kommen Bedenken über die später Verwendung der aufgezeichneten Daten auf. Vor Beginn der Fallstudien im Forschungslabor wurde mit jedem Probanden einzeln eine Vereinbarung über die vertrauliche Verwendung der Daten abgeschlossen. Daraus geht nebst den Bestimmungen über die Verwendung der Daten auch das ausdrückliche Recht der Probanden hervor, die Versuche jederzeit abubrechen und das Löschen der Daten zu verlangen.

Ein weiterer Aspekt, welcher die Akzeptanz für den Einsatz von Simulatoren beeinflusst, ist der Umstand, dass auch bei grösstmöglichem Detaillierungsgrad des Simulators der Realitätsnähe Grenzen gesetzt sind. So zum Beispiel kann den Erwartungen erfahrener Lokführer bezüglich frühzeitigem Erkennen von Signalen auch bei höchster Auflösung des Bildes für die Visualisie-

rung des Geländemodells oft nicht Rechnung getragen werden. Aus kommunikationstheoretischer Sichtweise durchläuft der Austausch von Informationen von der Informationsquelle im Geländemodell bis zum Lokführer als Informationsempfänger eine Reihe von Stufen. Zu Beginn wird die Information physikalisch repräsentiert, bevor sie mittels dem Adressaten bekanntem Code die Verbindung aufbauen. Eine Organisation verhindert die unerwünschte Anhäufung von Daten, was zu den Inhalten auf oberster Stufe führt und damit die Voraussetzungen für die Informationsgewinnung liefert. Erst mit der anschliessenden Informationsverarbeitung ist der Informationsprozess vervollständigt. (WISSEN 2009: 42) Als Grundvoraussetzung für diesen Prozess, beispielsweise bei der zeitgerechten Wahrnehmung eines Hauptsignals auf der Strecke ist demnach eine höchst mögliche Auflösung der Geländevisualisierung von grosser Bedeutung. Die Auflösung bestimmt über die authentische physikalische Repräsentation des Signals.

Aus den Fallstudien geht die Notwendigkeit einer mikroskopischen und authentischen Auflösung der Simulationsmodelle, insbesondere der Arbeitsplätze an den Schnittstellen Mensch-Maschine sowie in Bezug auf die Visualisierung der Geländemodelle hervor. Die Plausibilität der Ergebnisse von Fallstudien mit Probanden ist abhängig davon, wie die für die subjektive Wahrnehmung abgespeicherten Muster im Verlauf der Simulation erkannt werden. Diese individuell ausgeprägten Muster basieren auf Erfahrungen und müssen für das Hervorrufen realitätsnahen Verhaltens zur Anwendung kommen können.

Auch das Bewegungssystem vermag - wie in Abschnitt 4.12 festgestellt - auch bei bestmöglicher Ausprägung die Unterschiede zum Empfinden der Fahrdynamik in der Realität nur bis zu einem bestimmten Punkt zu überwinden.

6. Schlussfolgerungen

6.1 Fazit aus den empirischen Ergebnissen

Der Aufbau und Unterhalt eines universal anwendbaren Eisenbahn-Systemmodells ist mit akzeptablem Aufwand möglich und leistet einen wichtigen Beitrag für die Forschung und Entwicklung in den Bereichen Infrastruktur und Betriebsführung. Die Untersuchungen auf der Teststrecke rund um die Station Obermatt zeigen den Nutzen der Anwendung von Standards, sowohl in Bezug auf Datenformate, als auch auf die zu verwendenden Instrumente. Bei der Entwicklung von neuen Instrumenten und Schnittstellen ist diesem Umstand Rechnung zu tragen. In Bezug auf Datenaustausch ist es vorteilhaft, wenn generell mit dem Datenformat railML gearbeitet wird. Gelingt es, dieses Format bei der Weiterentwicklung der für den Aufbau, die Anwendung und die Instandhaltung des Eisenbahn-Systemmodells zu verwendenden Instrumente durchzusetzen, wird die Datenaufbereitung wesentlich vereinfacht, indem die Daten universell ausgetauscht und angewendet werden können.

Für die Modellierung von schweizerischen Eisenbahnstrecken ist das Geoinformationsgesetz (GeoIG) der Schweizerischen Eidgenossenschaft zu beachten. Das Gesetz beabsichtigt, dass raumbezogene Daten, die mit einem bestimmten Zeitbezug die Ausdehnung und Eigenschaften bestimmter Räume und Objekte beschreiben, den Behörden von Bund, Kantonen und Gemeinden sowie der Wirtschaft, der Wissenschaft und der Öffentlichkeit für eine breite Nutzung, nachhaltig, aktuell, rasch, einfach, in der erforderlichen Qualität und zu angemessenen Kosten zur Verfügung stehen. Geodaten, die auf einem rechtsetzenden Erlass des Bundes, eines Kantons oder einer Gemeinde beruhen, sind öffentlich zugänglich und können von jeder Person genutzt werden, sofern keine überwiegend öffentlichen oder privaten Interessen entgegenstehen. Die zuständigen Bundesämter erlassen technische Vorschriften für die Nutzung der Daten und legen unter anderem den Detaillierungsgrad der Daten fest. (SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT, 2007a: 1-4) Die im Aufbau begriffenen Geodatenbasismodelle bilden eine Grundlage für den Aufbau und die Instandhaltung eines gesamtheitlichen Eisenbahn-Systemmodells, da in diesen Modellen Informationen über die Gleisachsen verfügbar sind.

Insgesamt wird in dieser Arbeit der Nachweis der Machbarkeit eines zusammenhängenden Prozesses von Datenerhebung, Datenaufbereitung, Systemmodellierung und Anwendung von simulationsfähigen Modellen im Eisenbahnsystem erbracht. Damit können neue Ergebnisse generiert werden, um weitere offene Fragen insbesondere aus dem Bereich der Human Factors bei der Bahn anzugehen.

6.1.1 Begründung eines gesamtheitlichen Systemmodells

Die Gründe, die für einen möglichst netzweiten Aufbau eines Eisenbahn-Systemmodells im Sinne der in dieser Arbeit vorgestellten Versuche sprechen, sind vielfältig. Im Vordergrund stehen die Möglichkeiten, das simulationsfähige Modell interdisziplinär anzuwenden und damit gezielt Synergien zu nutzen. Eine dieser Synergien besteht zwischen den Bereichen der Personalaus- und der Forschung über Human Factors bei der Bahn. Die Ergebnisse aus den Fallstudien zeigen, dass für repräsentative Aussagen zu Untersuchungsgegenständen grössere Stichproben erforderlich sind, als dies im Rahmen dieses Projekts möglich gewesen ist.

An die Aus- und Weiterbildung von Lokführer und Zugverkehrsleiter sind zunehmend hohe Anforderungen gestellt. Laufende Veränderungen im Zuge der technischen Entwicklung sowie die

Umsetzung neuer Vorschriften erfordern den effizienten Einsatz von Ausbildungsinstrumenten. Vor dem Hintergrund der Automatisierung ergeben sich neue Synergien zu Ausbildungsgrundsätzen und -techniken aus anderen Bereichen wie zum Beispiel jenem der Armee. Heute muss das Personal zunehmend über Handlungskompetenz für Prozesse und die Bewältigung von Situationen verfügen, welche in der Realität kaum mehr geübt oder in der Praxis erlebt werden können. Im Ereignisfall lassen die drohenden Gefahren und die Höhe des Schadenspotentials keine Fehlhandlungen zu. Mit der Ausbildung von Situationen, welche in der Realität nicht geübt werden können, hat insbesondere die Armee langjährige Erfahrung. Für den Betrieb von neuen, komplexen Infrastrukturen - wie zum Beispiel lange Tunnels - sind aus diesen Gründen Simulatoren erforderlich, welche universell sowohl für die Ausbildung als auch für die Forschung angewendet werden können. Dies erlaubt einen frühzeitigen, wertvollen Informationsaustausch zwischen Personal, Eisenbahnunternehmen, Infrastrukturbetreiber, Forschungs- und Bildungsinstitutionen, Behörden und der Industrie.

Zusammenfassend können folgende Gründe geltend gemacht werden, welche Bezug nehmend auf die Ergebnisse dieser Arbeit für ein gesamtheitliches Eisenbahn-Systemmodell der Schweiz sprechen:

- Aufbau, Aktualisierung und Instandhaltung einer breiten Datenbasis für die vielseitige Verwendung mit dem Ziel der Unterstützung von Forschungsprojekten und Ausbildungstätigkeiten,
- Beitrag an die Unfallforschung unter Einsatz von Simulatoren mit dem Ziel, das bisher hohe Sicherheitsniveau der Schweizer Eisenbahnen zu halten oder sogar zu erhöhen,
- Anwendung von Simulatoren basierend auf dem Systemmodell und unter Nutzung der Synergien zu Forschungsprojekten im Bereich der Human Factors,
- Förderung des Informationsaustausches durch Partizipation des an den Schnittstellen Mensch-Maschine tätigen Personals mit sicherheitsrelevanten Funktionen,
- Entwicklung einer technischen Grundlage für die Plausibilisierung von betrieblichen und technischen Prozessen bei der Eisenbahn unter Anwendung von Simulatoren,
- Beitrag zur Entwicklung der Regelwerke im Bereich und im Umfeld der Eisenbahninfrastruktur und Eisenbahnbetriebsführung: Anwendung des simulationsfähigen Systemmodells für das Erzeugen von Erkenntnissen, welche in die gesetzlichen oder reglementarischen Grundlagen für die Sicherheit einfließen können,
- Vorhandensein eines allgemein zugänglichen und universell anwendbaren Modells für die Entwicklung und Plausibilisierung neuer Technologien, Bauarten, ergonomischen Grundsätzen usw. im Bereich der Eisenbahninfrastruktur und Eisenbahnbetriebsführung.

6.1.2 Chancen und Risiken

Die Anforderungen, welche an die Modellierung auf der Systemebene gestellt werden, stellen entsprechende Projekte vor grosse Herausforderungen. Die Erfahrungen aus der Modellierung der Teststrecke im Forschungslabor zeigen, dass die Abgrenzung einzelner Verantwortungsbereiche insbesondere unter Anwendung von standardisierten Elementen in Verbindung mit einer partizipativ gewichteten Projektleitung erreicht werden kann.

Nach dem Aufbau des Forschungslabors zum Zweck dieser Arbeit ist der Verein DESM (Dynamisches Eisenbahn System Modell) entstanden, der sich mit der Weiterentwicklung des Labors

bis zur Anwendungsreife befasst. Im ersten Businessplan für dieses Projekt sind die möglichen Chancen und Risiken für ein solches Projekt aufgeführt (Tabelle 23). Die Betrachtungen der Chancen und Risiken aus unternehmerischer Sicht geben einen Eindruck der Herausforderungen, die mit dem Aufbau, Betrieb und der Instandhaltung eines universellen Eisenbahn-Systemmodells verbunden sind.

Chancen
• einzige Anwendung von integrierten Simulatoren im Bereich der Eisenbahn (Marktlücke),
• neue Instrumente für die Untersuchung von Problemstellungen an den Schnittstellen Mensch-Maschine bei der Eisenbahn,
• Miteinbeziehung der Forschung im Bereich Human Factors bei der Bahn und Nachfrage durch Verkehrszunahme, Automatisierungsdruck sowie Unfälle,
• technische Innovation: In der Schweiz gibt es keinen integrierten Eisenbahnsimulator, das Systemmodell ist bisher ohne Mitbewerber,
• im Forschungslabor sind funktionierende Simulatoren für die Untersuchung von komplexen Problemstellungen bei der Bahn vorhanden,
• das Projekt spezialisiert sich auf die Schnittstellen Mensch-Maschine und bietet damit Instrumente im Fachbereich des Human Factors bei der Bahn, welcher bis heute kaum untersucht wird.
Risiken
• hohe Entwicklungs- und Abschreibungen stellen für die Rentabilität eine grosse Herausforderung dar.
• die Forschungsdefizite im Bereich des Human Factors der Bahn werden erkannt,
• technische Entwicklung: Integrierte Simulatoren für Eisenbahnsysteme werden durch Mitbewerber zu Standardinstrumenten entwickelt,
• Anwendungsreife: Die einzelnen Komponenten des Simulators sollten laufend weiter entwickelt und die Simulatoren auf den Stand der Technik gebracht werden,
• das Forschungslabor benötigt für die Anwendung einen gut erreichbaren und angemessenen Standort.

SUTER 2014

Tabelle 23: Chancen und Risiken für den Aufbau eines Eisenbahn-Systemmodells mit Fokus auf simulationsbasierte Anwendungen im Forschungslabor. (VEREIN DESM, 2014: 4ff)

6.2 Beitrag zur Theoriebildung

Die Untersuchungen über die mögliche Gestaltung eines Eisenbahn-Systemmodells brachten vier wichtige Gesamtergebnisse hervor, welche an dieser Stelle kurz diskutiert werden sollen. Als Grundlage für die Betrachtung von Einwirkung der Resultate auf Systemebene wird die Abbildung 93 beigezogen. Dieser Grafik kann entnommen werden, dass die Erkenntnisse aus den Untersuchungen zu den einzelnen Arbeitsschritten sowohl auf die vorangehenden Schritte als auch auf sich selbst zurückwirken können.

Beim ersten Schritt der Datenerhebung wurde festgestellt, dass - im Gegensatz zur Visualisierung der Modelle - eine mesoskopische Auflösung genügt. So zum Beispiel ist für die Anwendungen der Modelle eine Verortung der Signale im Geländemodell mit einer lokalen Abweichung im mm-Bereich nicht relevant. Mit einer Abweichung von ± 1 Meter erfüllt das Modell durchaus seinen Zweck. Damit ist die Erfassung der Infrastruktur mit verschiedenen Werkzeugen, auch auf der Basis von georeferenzierten Videoaufnahmen möglich, wie das in dieser Arbeit am Beispiel des Erfassungstools QRailScan aufgezeigt wurde. Versuche auf der Teststrecke zeigen, dass die videobasierte Erfassung von Infrastrukturdaten in durchschnittlich 50 Minuten pro Streckenkilometer erfolgen kann (vgl. Abschnitt 4.4 und Tabelle 12). Mit seiner Arbeit zeigt SALZGEBER (2013) die Machbarkeit automatischer Signalerkennung auf der Basis photogrammetrischer Methoden.

Hinsichtlich der Anwendung erhobener Daten wurde am Beispiel des Formats railML erkannt, welchen Nutzen ein digitales Datenaustauschformat bringt: Die erhobenen Daten können anwendungsübergreifend verfügbar gemacht werden, was den Zugang auf das Modell auch für andere Instrumente ermöglicht, welche auf der Basis railML funktionieren. Damit kann der kosten- und zeitintensive Aufwand z.B. für die Verifikation von Daten vermindert werden. Der regelbasierte Aufbau von railML ermöglicht einen hohen Flexibilitätsgrad in Bezug auf Erweiterbarkeit. (LODEMANN/GERKE/LUTTENBERGER 2010: 9) Diese Eigenschaft stellt eine wichtige Grundlage für den Einbezug von zeitlichen Attributen über die Gültigkeit von Infrastrukturobjekten auf der Zeitachse dar.

Aus den Ergebnissen dieser Arbeit geht hervor, dass für die Gestaltung eines Eisenbahn-Systemmodells mit einer realitätsnahen Visualisierung des Geländemodells eine mesoskopische Genauigkeit bei der Datenerhebung von ± 1 Meter ausreicht. Auf Grund der hohen Interdisziplinarität des Modells ist anzustreben, die Daten im international anerkannten Format railML abzulegen und anzuwenden. Beide Ergebnisse stellen eine wichtige Grundvoraussetzung für die Optimierung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses dar.

Für die Modellierung, ausgerichtet auf integrierte Simulationsmodelle ist eine Middleware zu entwickeln, welche durch ihre offene und modulare Architektur die Anbindung aller denkbaren Simulationsprogramme über Schnittstellen erlaubt. Aus Aufwandgründen ist eine einheitliche Gestaltung der Schnittstellen vorteilhaft. Auch die Modellierung der Stellwerklogik sollte standardisiert und an bisherige Entwicklungen angelehnt werden, um die Verbindung mit anderen existierenden Modellen zu ermöglichen. Die Modellierung der Sicherungsanlagen sollte auf die Integration von Stellwerk und Fahr Simulator über die Middleware ausgerichtet werden. Der Nachweis der Machbarkeit einer solchen Middleware wurde im Forschungslabor erbracht (s. Abschnitte 4.2, 4.3 und 4.2.2). Im Kreis der railML-Initiative wird derzeit ein neues Interlocking-Schema entwickelt, welches sich mit nicht physischen Infrastrukturobjekten wie Fahrstrasse oder Durchrutschweg befasst. Diese Objekte enthalten jedoch physische Objekte wie Weichen, Signale und Gleisabschnitte. (LEHMANN/ALBRECHT 2008: 15) Unter Berücksichtigung dieser Entwicklung, zusammen mit der Gestaltung des Eisenbahn-Systemmodells, ist die Modellierung der Stellwerklogik getrennt zu betrachten und auf die einzelnen Funktionen der verschiedenen Stellwerktypen auszurichten. Auf der Basis einer Funktionsmatrix (vgl. Abschnitt 4.2.2 und Anhang), welche wiederum der Verschlusstabelle zu Grunde liegt, ist es möglich, die typenspezifische Stellwerklogik zu standardisieren.

6.3 Rückblick auf die Arbeitsschritte für eine mögliche Modellgestaltung

Basierend auf den in Abschnitt 1.7 vorgestellten vier grundsätzlichen Arbeitsschritte für die Gestaltung eines Eisenbahn-Systemmodells geht es an dieser Stelle darum, die wichtigsten Erkenntnisse herzuleiten, die aus der Anwendung auf die vorangehenden Schritte einfließen können (Abbildung 94). Diese Überlegungen sollen einen Beitrag leisten, die Modellierung auf die spätere Anwendung in der Praxis auszurichten.

Die Modelle sollen auf der Basis von Simulatoren und Simulationsprogrammen angewendet werden können. Die Analyse von Unfällen, Ereignissen sowie Indizien aus der statistischen Risikobewertung zeigen, dass die meisten Ursachen für das Entstehen von Komplexität im Eisenbahnsystem von menschlichen Wahrnehmungen, Entscheidungen und Handlungen, einschliesslich der Kommunikation ausgehen. Die Durchführung und Auswertung der mit Lokführerinnen und Lokführern durchgeführten Fallstudien auf dem Fahr Simulator in Zusammenarbeit mit der Hochschule für Angewandte Psychologie bestätigen diese Aussage. Demnach wird aus der Anwendung der Modelle die Erkenntnis abgeleitet, dass ein Eisenbahn-Systemmodell auf die Schnittstellen

Mensch-Maschine auszurichten ist. Dies impliziert, dass eine nach Stand der Technik hohe Auflösung der Modelle angestrebt werden soll. Aus Gründen des Aufwands kann die Modellierung in mikroskopischer Auflösung jedoch lediglich in einem Geländeausschnitt umgesetzt werden. Das Vorsehen einer mikroskopischen Auflösung erfordert jedoch im Arbeitsschritt der Modellierung besondere Massnahmen wie die Auswahl von angemessenen Instrumenten, welche allenfalls auch nachträglich eine Steigerung des Detaillierungsgrades erlauben.

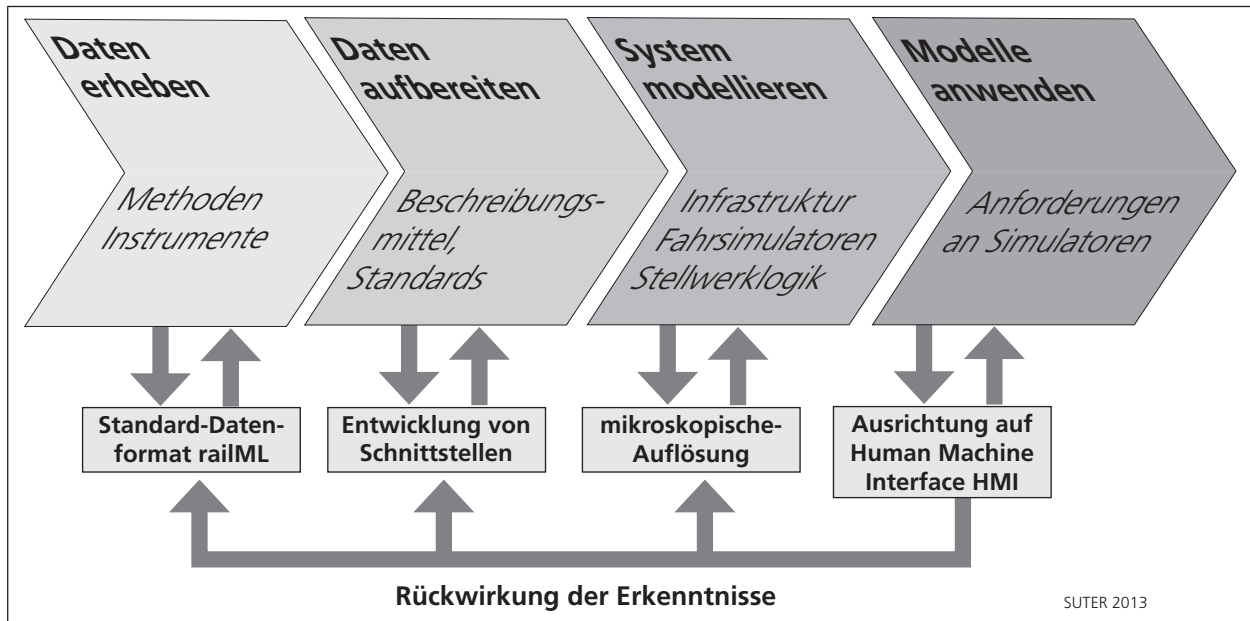


Abbildung 94: Zusammenfassung der Rückwirkungen von Erkenntnissen aus der Anwendung simulationsfähiger Modelle für die Untersuchung von komplexen Problemstellungen im Eisenbahnsystem auf die einzelnen grundsätzlichen Arbeitsschritte.

Bei der Datenaufbereitung sind frühzeitig Überlegungen zu den Datenformaten anzustellen. Auch wenn die Anwendung von Standarddatenformaten anzustreben ist, wird es auch künftig nicht möglich sein, sich bei der Aufbereitung von Daten auf ein Format zu verlassen. Der Aufbau eines Geländemodells erfordert ein interdisziplinäres Vorgehen, welches die Verarbeitung sowohl von Geodaten (z.B. im Format INTERLIS) als auch von eisenbahnspezifischen Daten (z.B. im Format railML) erlaubt. Daraus abgeleitet entsteht die Erkenntnis für den ersten Arbeitsschritt der Datenerhebung, welche sich an Standards ausrichten soll, um einen möglichst breiten und direkten Datenaustausch zu ermöglichen. Die Instrumente für die Datenerhebung lassen sich ebenfalls universell einsetzen und können auf jene Bereiche beschränkt werden, bei den die Daten nicht oder nicht in dem erforderlichen Format vorliegen.

Grundlage für die Verbindung einzelner Modelle und Simulationsprogramme ist die Entwicklung einer offen und modular aufgebauten Middleware. Während die Fahrzeuglogik Sache der Simulationssoftware ist, muss auch die Stellwerklogik separat modelliert und über Schnittstellen mit der Middleware verbunden werden. Dies ermöglicht eine unabhängige Standardisierung mit Rücksicht auf die Vielfalt der Stellwerktypen, basierend auf einer Funktionsmatrix.

Im Gegensatz zur Auflösung des Datenmodells muss die Visualisierung des Geländemodells in mikroskopischer Auflösung erfolgen. Damit erfolgt die Visualisierung im Bereich des sogenannten Pseudorealismus. Den Zusammenhang zwischen der Datengenauigkeit und dem Realismus beschreibt WISSEN (2009: 60), indem sehr realistisch aussehende Visualisierungen, basierend auf einer ungenauen Datenbasis, einen Pseudorealismus darstellen, während mit einem niedrigen Realitätsgrad korrekt wiedergegebene Daten potenziell einen unzureichenden Realismus liefern. Versuche mit Lokführern auf den Simulatoren zeigen, dass hinsichtlich Wahrnehmung auf einer

Eisenbahnstrecke der Realitätsgrad höher als die Datengenauigkeit zu gewichten ist. Dabei sind Datengenauigkeit und Datenvollständigkeit zu unterscheiden. Im Labor wurde aufgezeigt, dass für die Konzentration der Probanden auf ihre Arbeit in den Führerständen und an den Stellwerken - nebst dem Realitätsgrad - auch die Vollständigkeit der Daten von grosser Bedeutung ist.

Bei der Visualisierung des Geländemodells ist ein möglichst hoher Realitätsgrad anzustreben. Zusammen mit der weniger hoch gewichteten Datengenauigkeit befindet sich die Visualisierung im sogenannt pseudorealistischen Bereich. Sofern die Daten vollständig sind, erfüllt das Modell die Anforderungen für die Untersuchung von komplexen Problemstellungen an den Schnittstellen Mensch-Maschine.

Untersuchungen über menschliche Einflussfaktoren an den Schnittstellen Mensch-Maschine bei der Eisenbahn sind bis heute selten, sollten aber im Zuge der Automatisierung intensiviert werden: Die Entwicklung technischer Systeme - wie der Leittechnik für die automatisierte Betriebsführung - wird möglicherweise falsch eingeschätzt, wenn das menschliche Verhalten nicht explizit berücksichtigt wird. (MÖHLENBRINK 2010: 16) Durch die Automatisierung ist der Bediener allein zum Überwacher mutiert, weil die manuellen Prozesse durch die Technik übernommen wurden. Dadurch lassen sich die Verantwortungsbereiche räumlich vergrössern und zentralisieren, womit der Einfluss des noch verbliebenen Personals an Bedeutung gewinnt.

Die Analyse auf Systemebene im Kapitel 3 dieser Arbeit zeigen, dass es besonders an den Schnittstellen Mensch-Maschine (Lokführer, Zugverkehrsleiter und Betriebsführung) nichtlineare Beziehungen gibt, die sich aufschaukeln können. Das Einschätzen nichtlinearer Beziehungen überfordert oft unser Vorstellungsvermögen und führt zu falschen Schlüssen, da sich Ursachen und Wirkungen nicht im gleichen Masse verändern. (VESTER 1983: 41) Grenz- und Schwellenwerte menschlichen Verhaltens werden höchstens bei Unfällen sichtbar. Heute fehlen jedoch oft die Ressourcen und die Instrumente, um hier vertiefte Untersuchungen anzustellen.

Die Gestaltung von Simulatoren sind auf die menschlichen Einflussfaktoren auszurichten. Dies erlaubt einerseits Untersuchungen an den Schnittstellen Mensch-Maschine über den Einfluss der Human Factors, andererseits können die Instrumente auch für eine effiziente Ausbildung genutzt werden, wobei auch Synergien zu beachten sind. Aus der Analyse des Eisenbahnsystems gehen für die Elemente Zugverkehrsleiter, Lokführer und Betriebsführung besondere Sensitivitäten hervor: Für die vertiefte Untersuchung über die Wirkung dieser Sensitivitäten können mittels Simulatoren neue Ergebnisse generiert werden.

6.4 Hypothesentest

In diesem Abschnitt werden die Resultate zusammen gefasst und den Hypothesen gegenüber gestellt. In Kapitel 4 wurde in einem ersten empirischen Teil die Komplexität im Eisenbahnsystem, insbesondere im Rahmen der Betriebsführung behandelt, um aufzuzeigen, was vor dem Hintergrund der vorliegenden Arbeit unter komplexen Problemstellungen, welche nicht oder nicht in ausreichender Tiefe auf linearem Weg zu untersuchen sind, zu verstehen ist. Die Grundlagen dazu wurden auf der Basis von Beobachtungen im laufenden Betrieb und bei der Entwicklung von neuen Systemen sowie von Resultaten aus der Analyse von Ereignissen und Unfällen hergeleitet. Es geht die Erkenntnis hervor, dass viele Fragen insbesondere im Zusammenhang mit dem Bereich der Human Factors oft nicht in ausreichender Tiefe untersucht werden. Hierfür werden Gründe wie fehlende Ressourcen, Zuständigkeiten oder Machbarkeit geltend gemacht.

Die theoretischen Analysen in Kapitel 3 befasste sich mit der Analyse eines Eisenbahn-Systemmodells mit dem Ziel, die relevanten Systemelemente zu erkennen und deren Rolle im Gesamtsystem

zu verstehen. Ferner soll der Einfluss von Veränderungen an einzelnen Systemelementen auf das Gesamtsystem aufgezeigt werden können, um mehr über die Überlebensfähigkeit des Systems zu erfahren. Auf dieser Basis könnten Sensitivitäten erkannt werden, welche für die Modellierung des Eisenbahnsystems von grundsätzlicher Bedeutung sind. Aus der Analyse geht hervor, dass insbesondere signifikante Eingriffe in die Betriebsführung ausser Kontrolle geraten können, da sie sowohl stark aktive Eigenschaften aufweisen als auch stark im System vernetzt sind. Die Systemelemente *Zugverkehrsleiter*, *Stellwerk*, *Lokführer*, *Züge/Fahrzeuge* und *Fahrplan* können durch ihre Vernetzung starke Zustandsänderungen im Gesamtsystem hervorrufen und sind dementsprechend mit Vorsicht zu behandeln. Aus diesen Resultaten geht die Notwendigkeit hervor, die genannten Systemelemente in das Eisenbahn-Systemmodell gleichzeitig einzubeziehen, um damit das gesamte Wirkungsgefüge zu berücksichtigen.

Aus den in Kapitel 4 beschriebenen Untersuchungen im Forschungslabor auf der Basis von Experimenten gehen technische Anforderungen hervor, welche an Simulatoren für die Untersuchung von komplexen Problemstellungen zu stellen sind. Versuche mit dem elektronischen Instrument QRailScan für die videobasierte Erhebung der Infrastrukturdaten auf Eisenbahnstrecken zeigen die Effizienz dieses universell einsetzbaren Instruments. Diese Form der Datenerhebung bildet die Grundlage für die Modellierung der Infrastruktur insbesondere dann, wenn der Aufwand für die Datenbeschaffung in Folge fehlenden Zugangs sowie notwendiger Massnahmen für die Aufbereitung und Aktualisierung als zu gross erscheint. Eine Bewertung von drei Fahrsimulatoren zeigt, dass hinsichtlich dem Stand der Technik moderne Programme unter Verwendung digitaler 3D-Geländemodelle vorteilhaft erscheinen, besonders weil dieser Ansatz die grösste Flexibilität bei der Anwendung des Simulators bietet. Die Ergebnisse der Untersuchungen im Forschungslabor unterstreichen die Bedeutung einer möglichst hohen Bildauflösung für die Visualisierung des Geländemodells, einer mikroskopischen Detaillierung und Authentizität bei der Ausgestaltung der Arbeitsplätze an den Simulatoren sowie eines Bewegungssystems für die Modellierung der Fahrdynamik.

Das Kapitel 5 beinhaltet schliesslich die experimentellen Analysen, welche am Beispiel von Fallstudien unter Beteiligung von 20 Lokführerinnen und Lokführer auf den Simulatoren im Forschungslabor aufzeigen, wie komplexe Problemstellungen mit Simulatoren untersucht werden können. Dabei werden anhand von zwei verwendeten Szenarien die Untersuchungsergebnisse vorgestellt und vor dem Hintergrund der Verwendung von Simulatoren zu Forschungszwecken kommentiert. Für die Datenerhebung eignen sich drei Verfahren, die auf quantitative und qualitative Methoden basieren. Damit wird ersichtlich, wie mit Simulatoren Ergebnisse über nicht-komplexe Untersuchungsgegenstände generiert werden können, welche auf linearem Wege nicht erreichbar sind.

Die Resultate aus den vier empirischen Teilen dieser Arbeit werden im Folgenden anhand der in Abschnitt 1.8 vorgestellten Hypothesen reflektiert.

Hypothese 1: Komplexe Problemstellungen aus der Eisenbahnbetriebsführung lassen sich vor allem mit Simulatoren und empirischem Methoden untersuchen. Komplexität drückt sich dadurch aus, dass sich die Probleme nicht oder nur teilweise auf mathematisch-analytischem Weg beschreiben lassen.

Die Hypothese wird angenommen. In Konsequenz zu den eingangs in diesem Abschnitt erwähnten Feststellungen zu den Systemelementen *Zugverkehrsleiter*, *Stellwerk*, *Lokführer*, *Züge/Fahrzeuge* und *Fahrplan* wird angenommen, dass Komplexität vor allem an den Schnittstellen Mensch-Maschine der erwähnten Berufe entsteht. Am Beispiel von Fallstudien mit freiwilligen Lokführerinnen und Lokführern und in Zusammenarbeit mit der Hochschule für Angewandte Psychologie

wird deutlich, dass die mittels Simulatoren erhobenen Daten über das Verhalten und die Reaktionen der Probanden nicht auf linearem Weg erhoben werden können. Eine systematische Analyse von Problemstellungen - wie am Beispiel der Vorbeifahrt bei Halt zeigenden Signalen vorgestellt - bringt relevante Einflussfaktoren zu Tage, für welche keine quantitativen Messgrößen vorliegen. Abgesehen von den menschlichen Faktoren können auch Eingriffe auf das Systemelement *Fahrplan* unkontrollierbare Auswirkungen auf das System zeigen. Für Untersuchungen mit dem Ziel der Stabilisierung des Fahrplansystems werden heute vermehrt Simulationsprogramme wie OpenTrack eingesetzt.

Hypothese 2: Die Möglichkeit, Modelle in Simulatoren anwenden zu können erlaubt die Untersuchung von Wechselwirkungen zwischen dem Eisenbahnsystem und Umsystemen. Ferner können mit verhältnismässig geringem Aufwand weitere Annahmen plausibilisiert und Hypothesen untersucht werden.

Die Hypothese wird angenommen. Dieses Ergebnis stützt die Resultate aus den Fallstudien sowie aus den Experimenten im Forschungslabor. Die Abgrenzung des Eisenbahn-Systemmodells kann über die Mustererfassung gemäss Abschnitt 3.7 vorgenommen werden, wobei die für das System relevanten Elemente hervor gehen. Dazu wurden elf relevante Systemelemente definiert. Zu den Umsystemen können demnach Elemente wie der Strassenverkehr gezählt werden, welche mit dem Eisenbahn-System an ihren Schnittstellen - den Bahnübergängen in Berührung kommen. Ebenso gehören Elemente der Umwelt wie die der momentane Zustand der Atmosphäre (meteorologische Bedingungen) zu den Umsystemen. Zu beiden genannten Umsystemen bestehen Wechselwirkungen zum Eisenbahnsystem, welche im Sinne der vorliegenden Arbeit deshalb als nicht relevant angesehen werden, da sie die Überlebensfähigkeit des Eisenbahnsystems nicht in genügendem Masse beeinträchtigen können. Dennoch bilden die Wechselwirkungen in vielerlei Hinsicht - wie zum Beispiel bei der Frage, in welcher Form Bahnübergänge beim European Train Control System ETCS implementiert werden sollen - wichtige Untersuchungsgegenstände, für welche der Einsatz von Simulatoren sinnvoll erscheinen kann.

Hypothese 3: Es besteht die Nachfrage nach einer Anwendung von Modellen, mit welchen die Auswirkungen von Einflüssen in Abhängigkeit zu zeitlichen Veränderungen untersucht werden können. Dies bildet eine wichtige Voraussetzung, Erfahrungen aus der Vergangenheit in die Zukunft projizieren zu können. Solche Modelle können dann hergestellt werden, wenn die Objektdaten über entsprechende Zeitattribute verfügen.

Die Hypothese wird teilweise angenommen. Im Rahmen dieser Arbeit konnten keine konkreten Beispiele von Projekten bei der Bahn gefunden werden, welche einen bewussten Bedarf nach einem Modell für Anwendungen im Zusammenhang mit zeitlichen Veränderungen ausweisen. Am Beispiel der Betriebssimulation OpenTrack werden jedoch oft geplante Eisenbahnstrecken oder Streckenabschnitte modelliert, um Erkenntnisse über den künftigen Betrieb zu gewinnen und damit die Projektierung zu plausibilisieren. Insbesondere für Sensitivitätsanalysen bringen Untersuchungen unter Einbezug zeitlicher Veränderungen einen Nutzen, indem bei Eingriffen auf einzelne Elemente die veränderten Wirkungen auf der Systemebene festgestellt werden können.

Für die Umsetzung der Modellierung können die erhobenen Infrastrukturdaten nach ihrer zeitlichen Gültigkeit zusammengefasst und in verschiedenen Verzeichnissen abgelegt werden. Auf dieser Basis ist es möglich, die Modellierung von Eisenbahnsystemen beliebiger Epochen vorzunehmen. Die Vereinigung railML zeigt sich grundsätzlich offen für bedürfnisorientierte Ergänzungen ihrer Schemata. Für die Instrumente, mit welchen die Modellierung vorgenommen wird, sind entsprechende Schnittstellen zu konstruieren. Auf diese Weise ist es möglich, die Zustände einzelner Systemelemente auf der systemischen Zeitachse zu verschieben. Demnach kann die Be-

triebsführung einer Strecke mit Stellwerken verschiedener Generationen modelliert und mittels Simulation getestet werden.

Hypothese 4: Die Visualisierung der Umwelt bzw. des Geländes für den Simulator ist nicht nur Selbstzweck. Vielmehr bildet das Geländemodell eine wichtige Grundlage für interdisziplinäre Untersuchungen. Die Ausgestaltung des Geländemodells bestimmt im Wesentlichen den Abstraktionsgrad des Simulators.

Die Hypothese wird bestätigt. Sowohl aus den Untersuchungen im Labor über die Anforderungen an Simulatoren zu Forschungszwecken als auch aus Interviews mit Instruktoren im Mechanisierten Ausbildungszentrum der Armee MAZ und den Fallstudien auf Simulatoren mit Lokführern konnte nachgewiesen werden, dass die makroskopische Auflösung und fensterfüllende Visualisierung des Geländemodells eine wichtige Grundlage für den Erfolg der Simulationen darstellt. Damit ein in gewünschtem Masse authentisches Verhalten der Probanden hervorgerufen wird, müssen sie sich wie in der Realität in ihre angestammte Arbeit vertiefen können. Aus den Versuchen im Forschungslabor und den Erfahrungen aus dem MAZ geht hervor, dass der Stand der Technik durch die Anwendung von 3D-Geländemodellen zu diesem Zweck erlaubt. Mit moderner Technik wird eine Landschaftsvisualisierung in einer Auflösung ermöglicht, welche dem Videobild ähnlich kommt. Der grosse Vorteil des digitalen 3D-Modells besteht in seiner flexiblen Nutzung. Die Notwendigkeit einer mikroskopischen Geländevisualisierung geht zudem auch aus dem Prozess der subjektiven Wahrnehmung hervor, nach welchem man nur jene Muster richtig erkennen kann, welche in einem Mustervorrat vorhanden sind. (NINCK/BÜRKI/HUNGERBÜHLER/MÜHLEMANN, 2004: 24) Wie bereits in Abschnitt 2.1.2 und Abbildung 7 dargestellt, beruht Wahrnehmung auf Erfahrungen aus der Realität, welchen die Geländevisualisierung so weit wie möglich gerecht werden muss, um realitätsnahes Verhalten und Reagieren der Probanden zu ermöglichen.

Hypothese 5: Es ist möglich, eine gesamtheitliche Datenbasis als Grundlage für die Modellierung von Eisenbahnsystemen oder -teilsystemen zu schaffen. Dabei sind bestehende oder im Aufbau begriffene Standardisierungen in Betracht zu ziehen, um eine vielseitige Verwendung der Daten zu ermöglichen.

Die Hypothese wird angenommen. Die Versuche auf der Teststrecke zwischen Emmenmatt bzw. Zollbrück - Obermatt und Langnau, sowohl mit vorhandenen als auch mit videobasiert erhobenen Daten zeigen, dass diese Grundlage mit akzeptablen Aufwand geschaffen werden kann. Die Versuche mit der Datenerhebung im Labor lassen darauf schliessen, dass sich videobasierte Ansätze künftig weiter entwickeln, womit standardisierte Verfahren im Entstehen begriffen sind. Hinsichtlich Datenaustausch hat sich ein einheitliches Datenformat railML bereits so weit etabliert, dass von einem weltweit anerkannten Standard gesprochen werden kann. Dies begünstigt den Austausch von eisenbahntechnischen und eisenbahnbetrieblichen Daten deutlich. Insgesamt muss in Betracht gezogen werden, dass die Herausforderung bezüglich Datenhaltung weniger in der Beschaffung oder Erhebung als viel mehr in der zweckorientierten Auswahl und der Aktualisierung der Daten liegen.

Die Plausibilisierung von Annahmen sowie Untersuchung von Hypothesen unter Einsatz von Simulatoren hingegen geht aus dieser Arbeit direkt hervor, indem aus den qualitativen Datenerhebungen über Ergonomie, Zufriedenheit am Arbeitsplatz und aus statistischen Risiken abgeleitete Gefahrenthemen solche Szenarien abgeleitet werden können, welche nur mit Simulatoren untersucht werden können.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Problemstellung und Zielsetzung

Die Automatisierung im Eisenbahnsystem hat eine starke Zentralisierung der Betriebsführung zur Folge. Während die ehemals örtlich bedienten Stellwerke der Bahnhöfe und Stationen in Betriebszentralen zusammengefasst werden, äussert sich die Automatisierungstechnik bei den Fahrzeugen durch den Einbau moderner Zugbeeinflussungs- und Fahrerassistenzsysteme. Durch diese Entwicklung wird das Personal einerseits von manuellen Tätigkeiten entlastet, andererseits aber mit neuen Überwachungstätigkeiten betraut. Damit wird insbesondere bei der Betriebsführung der räumliche Verantwortungsbereich von Zugverkehrsleitern vergrössert. Diese Entwicklung bringt auch unerwünschte Nebenwirkungen mit sich: So zum Beispiel kann der Rückzug des Personals aus der Fläche einen gewissen Verlust von Systemkenntnissen und mehr Monotonie bei den Berufstätigkeiten bewirken. Erkenntnisse aus Ereignissen lassen Fragen über die Schnittstellen Mensch-Maschine offen, welche sich nicht oder nicht vollständig auf linearem oder mathematischem Weg beantworten lassen. Es wäre jedoch möglich, für solche Untersuchungen Simulatoren einzusetzen. Offensichtlich gibt es bei der Bahn noch keine durchgängige Forschung, welche sich mit dem Einfluss menschlicher Faktoren im Bereich der Bahn befasst. Aus der Literatur sind Beispiele bekannt, welche auf einen diesbezüglichen Vorsprung im Bereich des Luftverkehrs schliessen lassen.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Notwendigkeit einer Anwendung von Simulationsmodellen für die Untersuchung von komplexen Problemen bei der Bahn, welche nicht auf linearem Weg gelöst werden können. Daraus gehen Gestaltungsvorschläge hervor, welche die Arbeitsschritte Datenerhebung, Datenaufbereitung und Systemmodellierung optimieren und auf ihre Anwendung in Simulatoren zu oben beschriebenem Zweck ausrichten. Damit soll ein Beitrag geleistet werden, dass für künftige Untersuchungen im Zusammenhang mit dem Thema der Human Factors bei der Bahn angemessene Instrumente zur Verfügung stehen.

Theoretischer Hintergrund

In der Arbeit wird versucht, die Problemstellung aus systemtheoretischer Sichtweise anzugehen. Dies bringt die Notwendigkeit mit sich, das zu betrachtende System zu definieren und insbesondere auch die Wechselwirkungen zwischen den Systemelementen zu erkennen und zu berücksichtigen. Der theoretische Hintergrund wird durch spezifische Studien und Instrumente sowie durch statische und dynamische Modelle konkretisiert. Damit soll möglich gemacht werden, die Tätigkeiten der Datenerhebung, Datenaufbereitung, Systemmodellierung und der Anwendung der Modelle als zusammenhängenden Prozess zu betrachten, womit sich Erkenntnisse für die Gestaltung eines Eisenbahn-Systemmodells aufzeigen lassen.

Untersuchungsmethoden und -instrumente

Im Rahmen dieser Arbeit kommen quantitative und qualitative Methoden, Techniken und Werkzeuge zum Einsatz. Einerseits wird das elektronische Tool QRailScan für die videobasierte Datenerhebung für Eisenbahninfrastrukturen angewendet, um eine Teststrecke im Emmental zu modellieren. Für die Datenhaltung und –aufbereitung wird das Datenformat railML betrachtet, welches sich als internationaler Standard für Daten im Bereich von Eisenbahnanwendungen etabliert hat. Als Beschreibungsmittel werden Petrinetze hinzugezogen. Für die Untersuchung der Modellierung stehen im eigenen Forschungslabor die drei Simulatoren LOCSIM, FASI und ZUSI zur Verfügung, mit denen schliesslich Fallstudien mit Lokführerinnen und Lokführern durchgeführt werden, um daraus Erkenntnisse über den Einsatz von Simulatoren zu Forschungszwecken zu gewinnen. Diese sollen mit Informationen aus gezielten Experteninterviews ergänzt und plausibilisiert werden können.

Ergebnisse

Die Ergebnisse dieser Arbeit werden in vier empirischen Teilen vorgestellt. Der erste Teil befasst sich mit dem Thema der Komplexität im Eisenbahnsystem. Es werden einige Beispiele vorgestellt, aus welchen Fragen hervor gehen, die mit den heute üblicherweise angewendeten Methoden nicht ausreichend beantwortet werden können. In einem zweiten Teil wird das Eisenbahnsystem mit Blick auf diese Arbeit definiert und analysiert. Dabei gehen die relevanten Systemelemente, deren Rollen im Gesamtsystem und die Sensitivitäten einzelner Elemente hervor. Die Analyse zeigt, dass bei Eingriffen auf die Systemelemente *Zugverkehrsleiter*, *Lokführer* und *Betriebsführung* besondere Vorsicht geboten ist, da sich daraus aufschaukelnde Auswirkungen ergeben können. Dies bestätigt die Notwendigkeit nach Untersuchungen von Problemstellungen, welche insbesondere diese Systemelemente betreffen. Als Lösungsstrategie wird die Entwicklung eines *integrierten Simulators* vorgeschlagen, welche Fahr- und Stellwerks simulatoren miteinander verbindet. Im dritten empirischen Teil werden die Instrumente für die Datenerhebung und Systemmodellierung untersucht, um auf dieser Basis Experimente im Forschungslabor durchzuführen. Dabei gehen Vorschläge von Anforderungen an Simulatoren für die Untersuchungen von Mensch-Maschine-Interaktionen bei der Bahn hervor. Zudem soll die Machbarkeit für ausgewählte Lösungsansätze im Hinblick auf die Datenerhebung, –aufbereitung und Systemmodellierung nachgewiesen werden. Der vierte und letzte empirische Teil stellt schliesslich die in Zusammenarbeit mit der Schweizerischen Hochschule für Angewandte Psychologie und im Forschungslabor durchgeführten Versuche mit freiwilligen Lokführerinnen und Lokführern vor. Diese Fallstudien sollen an konkreten Beispielen aufzeigen, wie mit Einsatz von Simulatoren unter Anwendung wissenschaftlicher Methoden neue Erkenntnisse zu bisher offenen Fragen im Eisenbahnbetrieb gewonnen werden können.

Die Ergebnisse der Dissertation zeigen, dass Simulatoren vermehrt auf den Bereich der Human Factors ausgerichtet werden sollten, und dass bei der Personalausbildung auch Synergien zu Forschungsaktivitäten genutzt werden können. Es wird aufgezeigt, dass die Datenerhebung in einer mesoskopischen Auflösung den Anforderungen an eine Modellierung für die Verwendung in Fahr- und Stellwerks simulatoren genügt. Hingegen ist bei der Visualisierung der Geländemodelle die nach Stand der Technik höchst mögliche Auflösung anzustreben, um die Wirkung der Simulatoren als Forschungsinstrumente zu optimieren. Bei künftigen Datenerhebungen und der Entwicklung von neuen Instrumenten und Schnittstellen sollte auf die Kompatibilität zu Standardlösungen wie das Format railML geachtet werden, um einen effizienten Datenaustausch zu ermöglichen. Eine offene und auf Standards ausgerichtete Gestaltung eines Eisenbahn-Systemmodells stellt eine Grundvoraussetzung für dessen interdisziplinäre Nutzung dar.

Die Arbeit kommt zum Schluss, dass der Einsatz von Simulatoren für Untersuchungen von Mensch-Maschine-Interaktionen bei der Bahn nicht nur möglich, sondern auch notwendig ist. Aus diesem Erkenntnis werden Anforderungen an die Simulatoren vorgeschlagen, um sie zu oben genanntem Zweck einzusetzen. Diese Gestaltungsvorschläge sollen einen Beitrag an die Intensivierung wissenschaftlicher Aktivitäten im Bereich der Human Factors Forschung und damit an eine sicherheitsorientierte Weiterentwicklung der Automatisierung bei der Bahn leisten.

7.1 Künftige Verwendung von Simulatoren zu Untersuchungszwecken

Eine vertiefte Analyse anhand von verfügbaren Daten und Ergebnissen der behandelten Problemstellungen übersteigt die Möglichkeiten dieser Arbeit. Zudem müssten zum Erreichen weiterer Resultate auch Versuche mit einer grösseren Stichprobe von Probanden durchgeführt werden können. Die bisherigen Ergebnisse können jedoch einen Beitrag zum Verständnis für die Anwendung von Methoden und Instrumenten zwecks Forschung im Bereich Human Factors der Bahn leisten. So kann mit der von HAMMERL (2011: 153f) entwickelten Analytik das Zustandekommen einer

Sicherheitsfunktion im Mensch-Maschine-System klar dargestellt werden. Nachdem sich Modelle von Mensch-Barrieren-Interaktionen bereits bewährt haben, ist auch die Modellierung von Sicherheitsvorkehrungen in der Eisenbahntechnik bereits bekannt. Durch den Einsatz von realitätsnahen Simulatoren kann das menschliche Verhalten in den Entwicklungsprozess technischer Systeme einbezogen werden, um möglichen Fehleinschätzungen vorzubeugen. Als Beispiel sei an dieser Stelle die betriebliche Lenkung erwähnt, mit welcher durch Optimierung des Fahrtverlaufs innerhalb der Blocksperrzeiten eine Steigerung der Streckenkapazität und eine Stabilisierung des Fahrplans erreicht werden kann. Die Umsetzung dieser Ergänzung für die Betriebsführung ist gegenwärtig in Arbeit und in einer ersten Version in Betrieb. LÜTHI (2009: 188) weist den Erfolg der betrieblichen Lenkung anhand umfangreicher Versuche in der Umgebung von Luzern, Bern und Winterthur nach. Für die Entwicklung der Benutzeroberfläche müssten alle Akteure mit einbezogen werden und mit Versuchen auf Systemebene unterstützt werden, um die menschlichen Einflussfaktoren besser einzuschätzen.

Aus bisherigen Studien geht die Empfehlung hervor, auch aktuelle interaktive Systeme im Eisenbahnsystem auf ihre Usability zu überprüfen, um daraus Erkenntnis über die Gestaltung eines Re-Designs zu gewinnen. Dies wird insbesondere auch für das ETCS-Führerstandsdisplay gefordert. (HAMMERL/FELDMANN 2009: 319) Im Vorfeld der Fertigstellung und Inbetriebnahme von neuen Grossprojekten wie dem neuen Gotthard-Basistunnel GBT wäre ein Einsatz von Simulatoren für eine wirksame und effiziente Aus- und Weiterbildung des Personals sinnvoll. Durch das Aufbauen und Erhalten einer sicherheits- und ereignisorientierten Fachkompetenz bei Hunderten von Lokführern, Zugchefs, Zugverkehrsleitern, Personal für die Instandhaltung usw. entstehen Synergien, die für die Intensivierung der Forschung im Bereich des Human Factors bei der Bahn genutzt werden könnten. Bei solchen künftigen Untersuchungen sind auch die in dieser Arbeit aufgezeigten neuen Anforderungen an die Ausbildung der Bahn, indem das Personal durch den Wandel der Berufsbilder vor dem Hintergrund der Automatisierung und neuen Grossprojekten zunehmend über Fachkompetenzen verfügen muss, die zu Ausbildungs- und Übungszwecken in der Praxis nicht mehr erfahren werden können.

Eine Untersuchung der Fachhochschule Nordwestschweiz hat aufgezeigt, dass zur Expertise von Zugverkehrsleitern auch die richtige Blickstrategie gehört. Solche Erkenntnisse unterstützen auch die Gestaltung künftiger Mensch-Maschine-Schnittstellen. Die Forschung in diesem Bereich trägt zu einer weiteren Steigerung von Effektivität und Effizienz im Schienenverkehr bei. (BRÜNGER 2011: 7)

Im Hinblick auf die Datenaufbereitung und Modellierung von Eisenbahnsystemen ergeben sich aus den Resultaten dieser Arbeit Fragen über den Einsatz und die Weiterentwicklung von formalen Beschreibungsmitteln wie Petrinetze als Basis für die Modellierung der Stellwerklogik. Viele vorangehenden Arbeiten wie jene von MÖHLENBRINK (2010), ANTONI (2009), MEYER ZU HÖRSTE (2006) u.a. bilden in Verbindung mit dem Instrument II-Tool Voraussetzungen für die Entwicklung einer Methodik für die teilweise automatisierte Modellierung der Stellwerklogik, ausgehend von der Verschlussstabelle.

Die Modellierung der Infrastruktur erfordert viele Informationen sowie ein hohes Mass an Systemkenntnissen und Fachkompetenzen. Die zunehmend einfachere Bedienung der Simulationssoftware erlaubt es, auch diesbezüglich Laien mit hochspezialisierten Systemkenntnissen in den Prozess der Modellierung mit einzubeziehen. Dadurch kann zum Beispiel die Modellierung von Eisenbahnstrecken früherer Epochen unter Nutzung noch vorhandener Streckenkenntnisse ehemaliger Lokführer realisiert werden, womit die zeitraubende Informationsbeschaffung vereinfacht werden kann. Dieser partizipative Lösungsansatz für die Modellierung von Eisenbahnsystemen birgt Potential für weitere Untersuchungen, ebenso wie das Definieren und Testen von use-cases für die Anwendung von Simulationmodellen im Zeitintervall.

Die in dieser Arbeit vorgestellte Datenerhebung auf der Basis von Videoaufnahmen mit dem Instrument QRailScan gilt als vielversprechende Methode für künftige Anwendungen. Auch andere Instrumente wie SATengine (<http://www.signon-etcs.com/signon/etcs/signon/tools/sat.engine>, 29.01.2014) oder GPSinfradat (<http://www.gpsinfradat.de>, 29.01.2013) verwenden die videobasierte Datenerhebung und wurden zur Anwendungsreife weiterentwickelt. Die Ergebnisse aus der Arbeit von SALZGEBER (2013) über die photogrammetrisch unterstützte Signalerkennung zeigen neue Perspektiven im Bereich der Datenerhebung auf, welche weiter untersucht werden sollten.

Aus dem zwecks den Untersuchungen für diese Arbeit aufgebauten Forschungslabor ist der Verein DESM.ch entstanden, welcher sich künftig um die Weiterentwicklung und Anwendung der Instrumente kümmert. Aus heutiger Sicht, zusammen mit den Erkenntnissen aus dieser Arbeit ist zu hoffen, dass sich die Forschung im Bereich Human Factors auch bei der Bahn etabliert. Das Forschungslabor DESM steht mit seinen Simulatoren den Unternehmungen und Bildungsinstitutionen zur Verfügung, welche solche Instrumente für ihre Untersuchungen benötigen. Die Fallstudien mit Lokführerinnen und Lokführer in Zusammenarbeit mit der Fachhochschule Nordwestschweiz können dabei als Referenz und Basis für die Weiterentwicklung betrachtet werden. Für den Austausch von Informationen und Erfahrungen sollten auch andere ähnliche Institutionen, wie das Cab Technology Integration Laboratory (CTIL) in den USA kontaktiert werden. Das CTIL verfügt über einen umfangreichen Fahrsimulator, welcher ganz speziell auf Human Factors Forschung ausgelegt ist. (MELNIK 2013: 49)

7.2 Repräsentativität der Stichproben

Die Bildung der Stichproben für die Durchführung von Fallstudien ist jeweils kritisch zu hinterfragen. Die Stichprobe muss der Grundgesamtheit (Fallstudien: Gesamtheit der Lokführer) stark ähneln. Daher ist die Verteilung der Lokführer bezüglich Alter und Berufserfahrung (Anzahl Dienstjahre) in Kenntnis zu bringen, um die Stichprobe z.B. durch Klassenbildung erheben zu können. Unter der Annahme, dass diese bei Lokführern in der Schweiz gleichverteilt ist, kann eine geschichtete Stichprobe erhoben werden.

Am Beispiel der vorliegenden Stichprobe aus den Fallstudien soll im Folgenden dargestellt werden, wie die Verteilung der Lokführer punkto Alter getestet werden kann. Die statistische Testfrage lautet: Unterscheidet sich die Verteilung der Stichprobe von der angenommenen Gleichverteilung der Grundgesamtheit? Nach DÄLLENBACH (schriftliche Mitteilung vom 02.06.2014) eignet sich der χ^2 -Anpassungstest (vgl. Abbildung 95). Mit diesem Test lässt sich prüfen, ob die beobachtete Verteilung einer vorgegebenen Verteilung entspricht. χ^2 entspricht der Summe der normierten quadrierten Abweichungen zwischen Anzahl und Erwartungswert.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(h_i - h_E)^2}{h_E}$$

Abbildung 95: χ^2 -Test (Quelle: RIEDWYL 1978)

Nachfolgend werden die Lokführer der Stichprobe in acht Altersklassen zu je fünf Jahren zwischen dem 20. und dem 60. Altersjahr aufgeteilt. Ein Lokführer war zum Zeitpunkt der Fallstudien bereits pensioniert und wird daher nicht in den Verteilungstest mit einbezogen. Demnach beträgt der Stichprobenumfang $n = 19$. Aus der Anzahl der Altersklassen (8) minus 1 resultieren sieben Freiheitsgrade: $FG = 7$. Der kritische Wert für das Signifikanzniveau von $\alpha = 5\%$ wird der χ^2 -Tafel entnommen: $F(\alpha) = 14.07$. Aus dem Test geht die Grösse $\chi^2 = 16.099 > 14.07$ hervor. Demnach

unterscheidet sich die Verteilung der Stichprobe von der angenommenen Gleichverteilung aller Lokführer. Die angenommene Übereinstimmung der Verteilungen trifft hier nicht zu, jedoch aber bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 2,5\%$ ($\chi^2 = 16.013$).

Altersklasse	Anzahl Lf DESM h_i	Erwartungswert h_E	Differenz $h_i - h_E$	Quadrate normiert $(h_i - h_E)^2 / h_E$
7 Klassen	$n = 19$	Gleichverteilung bei $n = 19$	Anzahl Lf DESM - Erwartungswert	Differenz ² / Erwartungswert
20 - 24	0	2.375	--2.375	2.375
25 - 29	2	2.375	-0.375	0.059
30 - 34	0	2.375	-2.375	2.375
35 - 39	7	2.375	4.625	9.007
40 - 44	3	2.375	0.625	0.164
45 - 49	1	2.375	-1.375	0.796
50 - 54	5	2.375	2.625	2.901
55 - 59	1	2.375	-1.375	0.796
Testgrösse χ^2:	16.099			
Freiheitsgrade:	7			
95%-Quantil:	14.07			

Tabelle 24: χ^2 -Verteilungstest der Stichprobe aus den Fallstudien. (Quelle: DÄLLENBACH, schriftliche Stellungnahme vom 02.06.2014)

Bei der Auswertung von Fallstudien werden die während der Einsatzzeit auszuführenden Entscheidungen berücksichtigt. Dies führt zu wesentlich höheren Zahlen von Messwerten, als dies bei den bisherigen Fallstudien der Fall war. Mittels Korrelationsanalysen kann der Einfluss von Faktoren wie Alter und Erfahrung auf bestimmte Entscheidungen und Handlungen ermittelt werden. Bezüglich Signalfälle in der Schweiz ist durch die Meldepflicht die Grundgesamtheit bekannt. So zum Beispiel wurden im Jahr 2013 insgesamt 139 Fälle verzeichnet. Die Zahl der auszuführenden Entscheidungen pro Lokführer und Jahr kann annähernd abgeschätzt werden, bei den Fallstudien ist sie bekannt. Damit kann die Stichprobe mit der Grundgesamtheit in Relation gesetzt werden. Daraus geht hervor, dass auch bei relativ kleinem Stichprobenumfang ein repräsentatives Ergebnis erzielt werden kann. (VON BUXHOEVEDEN: mündliche Stellungnahme am 14.05.2014)

7.3 Berechnung des Gefährdungspotentials

Einzelne Situationen aus den in Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Fallstudien zeigen, dass das Simulationsinstrumentarium auch für Berechnungen des Gefährdungspotentials bestimmter Problemstellungen genutzt werden können. So zum Beispiel eignet sich der in Abschnitt 5.1.2 erwähnte Verwechslungsgefahr bei der Abgabe von Befehlen an den Lokführer für „Fahrt auf Sicht“ im Fall von Stellwerkstörungen (vgl. Tabelle 18, Dilemma Nr. AD8). Die potentielle Gefährdung besteht darin, dass der Lokführer nach Erhalt des Befehls irrtümlich und ohne Berechtigung beim Halt zeigenden Signal abfährt. Die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten einer solchen Fehlhandlung in dieser Situation bezeichnet das Gefährdungsereignis. Der Fehler des Lokführers hat eine Gefährdung zur Folge, indem er zum Beispiel mit seinem Zug in den Bereich einer anderen Fahrstrasse geraten und dort mit einem Zug kollidieren kann. Dieser andere Zug wird als exponiertes Objekt bezeichnet, welches sich mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit am entsprechenden Gefahrenpunkt befindet.

Im Jahr 2012 haben wurden auf dem schweizerischen Eisenbahnnetz acht meldepflichtige Fälle registriert, bei welchen ein Lokführer mit Befehl für „Fahrt auf Sicht“ irrtümlich Halt zeigendem Signal vorbei gefahren ist. Die Wahrscheinlichkeit des Gefährdungsereignisses lässt sich aus den Ergebnissen von Fallstudien berechnen. Bei den im Forschungslabor durchgeführten Versuchen waren zwei von 20 Probanden auf einer Strecke von 31 km von diesem Fehler betroffen, welcher sich an einem von insgesamt 23 Hauptsignalen ereignet hat. Jeder Proband war für diese Fallstudie durchschnittlich 0.65 Stunden im Einsatz.

Nebst der Grundgesamtheit aller in Wirklichkeit eingetretenen Fälle (8) ist auch die Gesamtzahl der potenziell betroffenen Lokführer (~5600) bekannt. Diese legen auf den gesamten Streckennetz von 5223 km mit ~5500 Hauptsignalen rund 300 Mio Zugskilometer zurück. Die gesamte Fahrzeit aller Lokführer kann mit 7 Mio Std./Jahr angenommen werden. Nachdem am Untersuchungs-ort die Gleisanlage, die durchschnittliche Zugsdichte und die Ausfallraten von Stellwerkanlagen bekannt sind, kann die wahrscheinliche Aufenthaltszeit von anderen Zügen im Gefahrenbereich ermittelt werden.

Das Modell der Risikogenese von SCHNIEDER/SCHNIEDER (2013) in Abbildung 96 hilft, den oben beschriebenen Ansatz für die Berechnung des Gefährdungspotentials zu verstehen. Das Simulationsinstrumentarium leisten insofern einen Beitrag an die Berechnung, indem Annahmen über die Eintretenswahrscheinlichkeiten und die Verteilung menschlicher Fehler plausibilisiert werden können. Dies ermöglicht genauere Ergebnisse bei der Bewertung des Gefährdungspotentials.

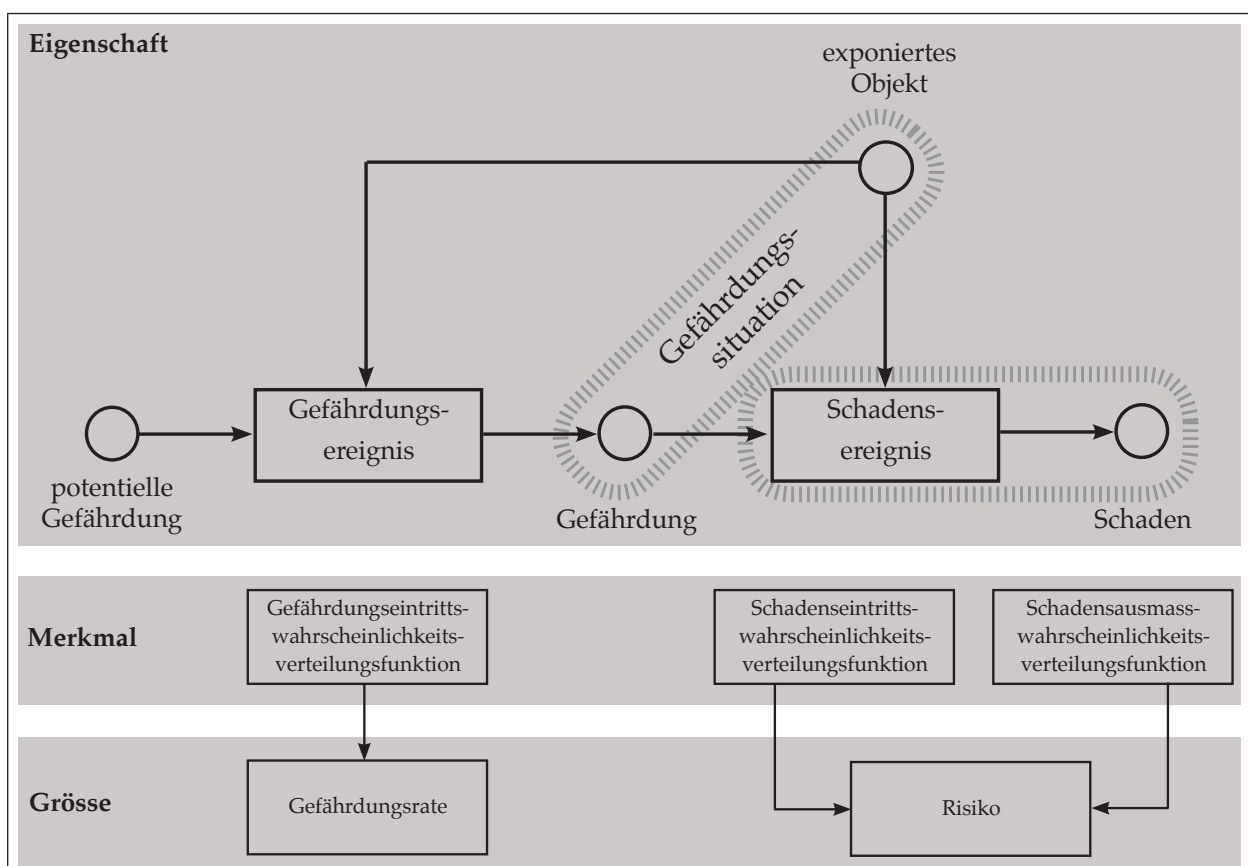


Abbildung 96: Modell der Risikogenese als Basis für die simulationsbasierte Berechnung des Gefährdungspotentials. (Eigene Darstellung nach SCHNIEDER/SCHNIEDER, 2013: 70)

Auf der Basis des Risikogenesemodells kann mit dem Simulationsinstrumentarium das Gefährdungspotential für beliebige Situationen ermittelt werden. Zu diesem Zweck muss eine repräsentative Stichprobe an Lokführern und Zugverkehrsleitern erhoben und ein Szenario einer vermuteten

Gefährdung im Eisenbahnbetrieb ausgearbeitet werden. Wenn dabei als Ereignis z.B. die Vorbeifahrt an einem Halt zeigendem Signal betrachtet werden soll, muss die relevante Umgebung der Eisenbahn-Infrastruktur im Simulator als Modell vorhanden sein. Nun kann die Verteilung der gemessenen Durchrutschwege zusammen mit der Verteilung der Wahrscheinlichkeiten des Aufenthalts anderer Züge im Gefahrenbereich betrachtet werden: Die Überschneidung der beiden Verteilungen entspricht dem Schadenspotential in dieser besonderen Situation.

Insbesondere auf Grund der Erkenntnisse über die Anwendung von Simulatoren wäre es wünschenswert, wenn für die künftige Entwicklung technischer Systeme an den Schnittstellen Mensch-Maschine in Analogie zu der Umweltverträglichkeitsprüfung eine Art „Menschenverträglichkeitsprüfung“ entstehen würde.

Verzeichnisse

Abbildungen

Abbildung 1 und 2: Entwicklung des Verkehrs in der Schweiz, gemessen in Personenkilometern (Pkm) und Tonnenkilometern (tkm). Der Anstieg mit der Verkehrsleistung ist mit dem Ausbau der entsprechenden Infrastruktur in Beziehung zu stellen.	12
Abbildung 3: Verschlusstabelle des Stellwerks von Emmenmatt aus dem Jahr 1938.	13
Abbildung 4: Zusammenhang von Modell, Realität und Sprache.	18
Abbildung 5: Prozess der wesentlichen Arbeitsschritte, welche den Untersuchungen dieser Arbeit zu Grunde liegen.	21
Abbildung 6: Grafische Übersicht der Arbeit.	23
Abbildung 7: Die Zusammenhänge von Situation Awareness, mentalen Modellen und Schemata.	26
Abbildung 8: Die Yerkes-Dodson-Kurve zeigt, dass sich Stress nicht von Anfang an schädlich auf die Leistung auswirkt.	26
Abbildung 9: Faktoren nach Endsley, welche die Situation Awareness beeinflussen und für Verbesserungsmassnahmen in Betracht gezogen werden können.	27
Abbildung 10: Schematische Darstellung für die Vorgehensweise für ein Planungsvorhaben, welche generell als gewollte Veränderung bestehender Systeme angesehen werden können, als Vergleich mit einer Diagnose und einer Therapie	30
Abbildung 11: grafische Darstellung der Vernetzung von Einflussvariablen am Beispiel der Sichtbarkeit eines Signals: Die durchgezogenen Pfeile bedeuten verstärkende, die gestrichelten Pfeile abschwächende Wirkung bei Veränderung der Ausgangsvariablen.	31
Abbildung 12: grafische Interpretation der Vernetzungsmatrix.	34
Abbildung 13: Beispielhafte Situation an der Signalstation Obermatt (Strecke Bern - Langnau - Luzern). Die Station ist mit einem elektromechanischen Stellwerk ausgerüstet, welches von einem Zugverkehrsleiter örtlich bedient wird.	36
Abbildung 14: Die oben beschriebene Beispielsituation als Petrinetz mit drei Teilnetzen zur Visualisierung der Anwendung von Petrinetzen für die Beschreibung von Problemstellungen aus der Eisenbahnbetriebsführung. Zur Vereinfachung wurden mögliche Fehler und Störungen nicht berücksichtigt.	37
Abbildung 15: Simulationsfähige Modellierung des Streckenblocks.	38
Abbildung 16: Hermeneutischer Zirkel	39
Abbildung 17: Auswahl der Fachpersonen für die Experteninterviews vor dem Hintergrund der grundsätzlichen Untersuchungsgegenstände dieser Arbeit.	40
Abbildung 18: Definition der Ruhelage am Stellwerk der Signalstation Obermatt nach einer Instruktion der damaligen Jura-Simplon-Bahn, um Missverständnisse und Fehlhandlungen auszuschliessen. Die Definitionen haben sich national und innerhalb von Fachbereichen getrennt entwickelt.	41
Abbildung 19: Entwurf der repräsentativen Elemente eines Eisenbahn-Systemmodells.	47
Abbildung 20: Untersuchung der wesentlichen Arbeitsschritte dieser Arbeit nach Abbildung 5 vor dem theoretischen Hintergrund.	48

Abbildung 21: zeigt die zwei zur Abfahrt bereiten Züge, wobei IC 991 einige Minuten zu spät verkehrt. Güterzug 48607 wartet vor dem einzigen Gruppensignal dieses Bahnhofs.....	53
Abbildung 22: In Folge einer Baustelle kann der IC nicht die gewohnten Gleise für die Ausfahrt aus dem Bahnhof benützen.....	53
Abbildung 23: Als das Signal für IC 991 Fahrt zeigt, ist dem Lokführer des Güterzugs nicht bewusst, dass es nicht für ihn gilt. Ein einziger Fehler, das Nichtbeachten eines Zwergsignals führt zu einer erheblichen Zuggefährdung	53
Abbildung 24: Das Wirkungsgefüge Wahrnehmung - Entscheidung - Handlung am Beispiel einer betrieblichen Situation	63
Abbildung 25: Die hippsche Wendescheibe wurde als erstes Signal der Schweizer Eisenbahnen im Jahre 1862 durch Matthias Hipp entworfen. Es wurde so gestaltet, dass es sich unter allen Witterungsbedingungen und Lichtverhältnissen genügend von der Umgebung abgrenzt	65
Abbildung 26: Netzwerkdiagramm am Beispiel der Problemstellung der Signalfälle im Schienenverkehr.....	68
Abbildung 27: Auswertung der Signalfälle strukturiert nach bekannten Gefahrenthemen, bei welchen sich die Fälle häufen und Tendenzen festgestellt werden können.....	69
Abbildung 28: Schematische Darstellung der Zusammenhänge von Blockabschnitten und Fahrleitungssektoren im Gotthard-Basistunnel GBT	70
Abbildung 29: Grafische Darstellung des Eisenbahn-Systemmodells als Netzwerk.....	73
Abbildung 30: Grafische Darstellung der Rollenverteilung der einzelnen Systemelemente.....	75
Abbildung 31: Übersicht des nachgebildeten Informationsflusses der Gesamtsimulation im Labor. Die schwarzen Pfeile zeigen die zu entwickelnden Schnittstellen, während die grauen Pfeile Schnittstellen vorhandener Systeme	80
Abbildung 32: Funktionsprinzip der Middleware „Dispatcher“ für die Integration von Fahr- und Stellwerksimulatoren	82
Abbildung 33: Verbindung von Simulator und Hardware sowie Integration der Stellwerklogik in den dynamischen Fahrsimulator LOCSIM mittels Middleware.....	83
Abbildung 34: Einbau des Mikrocontrollers mit Oktokoppler in das elektromechanische Stellwerk Obermatt durch DESM-Techniker im Forschungslabor.....	85
Abbildung 35: Übersicht über das Funktionsprinzip des videobasierten Datenerhebungsinstruments QRailScan	88
Abbildung 36: Gleisanlage des Bahnhofs Ramsei auf der Linie Burgdorf - Langnau.	89
Abbildung 37: Die Bedienungsoberfläche von QRailScan besteht aus drei Hauptbereichen: Rechts ist das Videobild mit dem aktuellen Standort auf der Streckenachse (Referenzmarke: weisse Linie) zu sehen	90
Abbildung 38: Übersicht über Arbeitsschritte für die Detektion von Haupt- und Vorsignalen in Videos	91
Abbildung 39: Ausschnitt der grafischen Oberfläche dieses Annotationsprogramms am Beispiel der Ausfahrtsignale in Schüpfheim Richtung Luzern.....	91
Abbildung 40: Speicherstruktur für Signalketten. Übersicht über die Detektions-Informationen, Verarbeitungsvariablen, sowie deren Anordnung	92
Abbildung 41 und 42: Die Aufnahme der Strecke auf der Hin- und Rückfahrt am gleichen Standort (zwischen Escholzmatt und Schüpfheim)	93

Abbildung 43: Der railML-Entwicklungsprozess zeigt das offene Konzept, nach welchem sich beliebige railML-Benutzer oder jede Institution frei in die Arbeit der Initiative einbringen können.....	97
Abbildung 44: Der Fahrsimulator Locsim, verbunden mit einem Führerstand vom Typ Re 4/4 im DESM-Forschungslabor.	99
Abbildung 45 und 42: Der Fahrsimulator FASI im DESM-Forschungslabor nach der Übernahme von den Schweizerischen Bundesbahnen SBB.....	101
Abbildung 47: Visualisierung der Systemsimulation ZUSI 3. Das Programm erlaubt die Integration von Fahrsimulatoren und Stellwerken	103
Abbildung 48: Örtliche Situation der Bahnlinien in der Umgebung der Signalstation Obermatt.	106
Abbildung 49: Auszug aus dem Streckenprofil der Bahnlinie 460 Bern - Langnau - Entlebuch - Luzern (Infrastruktur der SBB)	107
Abbildung 50: Auszug aus dem Streckenprofil der Bahnlinie 441 (Langnau -) Obermatt - Ramsei - Burgdorf, welche von der SBB-Linie 460 abzweigt (vgl. Abbildung 48 oben), wozu die Signalstation Obermatt dient.....	107
Abbildung 51 und 52: Entfernen des Einfahrsignals der Station Obermatt in der Videoaufnahme	109
Abbildung 53: Skizze der Aufsicht einer Projektionsfläche, mit welcher die Sicht des Lokführers (und des Beifahrers) auf das Gelände durch die Fensterumrandung und nicht durch die Leinwand begrenzt wird	112
Abbildung 54: Skizze der Ansicht für eine geneigte Projektionsfläche, die dem Lokführer im Führerstand der Re 4/4 sowohl sitzend als auch stehend eine fensterfüllende Sicht auf die Visualisierung des Geländes erlaubt.	112
Abbildung 55 und 56: Versuchsaufbau der Leinwand im Forschungslabor für die Visualisierung des Geländemodells am Führerstand der Re 4/4	112
Abbildung 57: Abweichung der Blickrichtung bzw. wahrgenommene Richtung der Gleisachse und der Fahrzeugachse bei der videobasierten Visualisierung des Geländemodells infolge unterschiedlichem Blickpunkt von Kamera bei der Aufnahme und Lokführer im Simulator	113
Abbildung 58: Planskizze für eine Rundsicht mit drei Projektoren, welche die Geländeeinsicht in einem Sektor von 180° erlauben. Projekt für den Simulator der Lok vom Typ Ae 6/6.	114
Abbildung 59 (s.a. Fragebogen Q4.2 im Anhang, Frage 1): Der FASI hinterlässt einen guten bis sehr guten Gesamteindruck, wozu vor allem die Detaillierung des Führerstandes, die Fahrdynamik und das Fahrgefühl beiträgt. Daraus kann der Schluss gezogen werden, dass das Bewegungssystem eine Notwendigkeit darstellt, damit sich die Lokführer realitätsnah verhalten	115
Abbildung 60 (s.a. Fragebogen Q4.2 im Anhang, Frage 2): Das Fahrgefühl im LOCSIM ist aus zwei Gründen mangelhaft: Erstens fehlt ein Bewegungssystem und zweitens muss die Projektion mit Rundsicht und abgeschlossener Kabine ergänzt werden. Der detaillierte Führerstand und Abbildung der Infrastruktur (Video) erhalten die meiste Zustimmung	115
Abbildung 61 (s.a. Fragebogen Q4.2 im Anhang, Frage 3): Sehr hohe Zustimmung findet die Integration von Betriebszentrale und Fahrsimulator. Für den überwiegenden Teil der Lokführer ist die hohe Detaillierung des Führerstandes und eine abgeschlossene Kabine wichtig. Das gleiche gilt für das Bewegungssystem.....	116

Abbildung 62: Verteilung der Lokführerinnen und Lokführer, die an den Fallstudien teilgenommen haben, hinsichtlich ihrer Berufserfahrung in Jahren. Allfällige Teilzeitarbeit wurde bei der Berechnung der Berufsjahre berücksichtigt.	119
Abbildung 63: Verteilung der Berufserfahrung der Lokführerinnen und Lokführer hinsichtlich Güterverkehr (blau) und Personenverkehr (grün).....	120
Abbildung 64: Beobachtung der Versuchsfahrt eines Lokführers durch die Fachexperten am Regiepult des Fahrsimulators FASI. Nebst der Studentin der FHNW sind zwei erfahrene Lokführer, der Operator des Simulators sowie der Informatiker anwesend.....	120
Abbildung 65 zu Dilemma AD2: Einfahrtsignal Däniken. Das Ausfahrsvorsignal zeigt Warnung, das nächste Hauptsignal zeigt somit Halt. Die Streckengeschwindigkeit beträgt 125 km/h, was eine rechtzeitige Reaktion erforderlich macht.....	123
Abbildung 66 zu Dilemma AD3: V-Ausführung 90 km/h am Einfahrtsignal von Aarau. Die entsprechende V-Ankündigung 90 km/h wurde am vorangehenden Signal erteilt. Dies ist eine planmässige Situation und stellt keine besonderen Anforderungen an den Lokführer...	124
Abbildung 67 zu Dilemma AD4: Die Türkontrolllampe (Pfeil) muss vor der Abfahrt gelöscht sein. Der Lokführer muss die Türen verriegeln, bis die Türfreigabetasten (links und rechts vom Pfeil) nur noch schwach leuchten	124
Abbildung 68 zu Dilemma AD13: Das Einfahrsvorsignal Brugg ist dunkel (Störung). Im rechten Gleis fehlen die Streckengeräte für die Zugsicherung (Pfeil).....	124
Abbildung 69: Verteilung der Fehler auf den Fahrten ohne besonderen Zeitdruck. Auf der x-Achse sind die beobachteten Dilemmata in ihrer chronologischen Reihenfolge aufgeführt.	125
Abbildung 70: Verteilung der Fehler auf den Fahrten unter Zeitdruck. In der zweiten Hälfte erhielt der Zug wegen einer Stellwerkstörung eine Verspätung	125
Abbildung 71 zu Dilemma AD1: Auswertung der Fahrdaten im Weg-Geschwindigkeits-Diagramm	126
Abbildung 72 zu Dilemma AD2: Verteilung der Reaktionen der Probanden beim Ausfahrsvorsignal Däniken in Warnstellung (gelbe Linie, Halt erwarten)	126
Abbildung 73 (zu Dilemma AD5) Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm der Annäherung an das Halt zeigende Einfahrtsignal Ruppertswil. Die Annäherungszeit bis zum Stillstand hingegen ist auf einem Zeitintervall von über 100 Sekunden verteilt.....	128
Abbildung 74 (zu Dilemma AD13) Geschwindigkeits-Weg-Diagramm ab Strecken-Km 33.3 bis in den Bahnhof Brugg. Die meisten Lokführer haben das dunkle Einfahrsvorsignal erkannt und die Geschwindigkeit vor dem Einfahrtsignal so ermässigt, dass sie vor dem Signal hätten anhalten können	128
Abbildung 75 zu Dilemma BD4: Meldung der Fahrzeugstörung im Führerstand mittels Störungslampe (roter Pfeil) und Diagnosemonitor links davon	130
Abbildung 76 zu Dilemma BD7: Bei der Durchfahrt durch den Bahnhof Dietikon ist in der Ferne das Umschalten eines Signals zu beobachten.....	130
Abbildung 77 zu Dilemma BD8: V-Ankündigung 60 km/h zwischen Schlieren und Altstetten. (SUTER 2013)	130
Abbildung 78 zu Dilemma BD11: Der Lokführer erhält einen unklaren Notruf und erkundigt sich beim Fahrdienstleiter über den Grund.....	131
Abbildung 79 zu Dilemma BD13: Das folgende Zwergsignal bei der Einfahrt in den Bahnhof Zürich HB zeigt ein unklares Signalbild: eine Lampe leuchtet nicht	131

Abbildung 80: Verteilung der Fehler der Probanden, die Zug 33837 von Baden nach Zürich ohne Zeitdruck führen.....	132
Abbildung 81: Verteilung der Fehler der Probanden mit Zeitdruck. Im Vergleich zu Abb. 79 fällt auf, dass die Fehlerquote rund doppelt so hoch ist. Ähnlich wie bei Szenario A befindet sich die grösste Zunahme der Fehler am Schluss der Fahrt.....	132
Abbildung 82 (zu Dilemmata BD4 bis BD 6): Geschwindigkeits-Weg-Diagramm im Vorfeld der Langsamfahrstelle (gelbe Linie: Standort Anfangssignal 80 km/h). Ein Traktionsausfall und eine Schutzstrecke haben die Situation zusätzlich erschwert	133
Abbildung 83 und 83: Vergleich der IST-Geschwindigkeiten aller Versuchszüge bei der Vorbeifahrt am Anfangssignal der Langsamfahrstelle 80 km/h	133
Abbildung 85 (zu Dilemma BD8): Geschwindigkeits-Weg-Diagramm der Strecke zwischen Schlieren und Zürich-Altstetten.	134
Abbildung 86 und 87 (zu Dilemma BD8): Vergleich der IST-Geschwindigkeiten aller Versuchszüge bei der Vorbeifahrt am Einfahrtsignal in Zürich-Altstetten, welches V-Ausführung 60 km/h zeigte. Die Vorsignalisierung im Zusammenhang mit dem Übergang von Signalsystem L zu Signalsystem N war nicht korrekt	135
Abbildung 88 (s.a. Fragebogen Q4.1 im Anhang, Frage 1): Beurteilung der Arbeitsplätze verschiedener Triebfahrzeugtypen durch die Lokführer (in Klammer steht das Baujahr der entsprechenden Triebfahrzeuge).....	140
Abbildung 89 (s.a. Fragebogen Q4.1 im Anhang, Frage 2): Beurteilung von Formen betrieblicher Lenkung durch die Lokführer.....	141
Abbildung 90 (s.a. Fragebogen Q4.1 im Anhang, Frage 3): Beurteilung des Nutzens betrieblicher Lenkung durch die Lokführer.....	141
Abbildung 91 (s.a. Fragebogen Q4.1 im Anhang, Frage 5): Bewertung der Personalfriedenheit aus Sicht der Probanden nach Skala der schweizerischen Schulnoten	142
Abbildung 92 (s.a. Fragebogen Q4.1 im Anhang, Frage 4): Die grafische Auswertung zeigt die Einschätzung durch die Lokführer über die Beeinträchtigung ihrer Arbeit durch Unzufriedenheit	142
Abbildung 93 (s.a. Fragebogen Q4.1 im Anhang, Frage 6): Die Bewertung von vorgegebenen und bekannten Gefahrenthemen durch die Lokführer	144
Abbildung 94: Zusammenfassung der Rückwirkungen von Erkenntnissen aus der Anwendung simulationsfähiger Modelle für die Untersuchung von komplexen Problemstellungen im Eisenbahnssystem auf die einzelnen grundsätzlichen Arbeitsschritte	151
Abbildung 95: χ^2 -Test	159
Abbildung 96: Modell der Risikogenese als Basis für die simulationsbasierte Berechnung des Gefährdungspotentials	161

Tabellen

Tabelle 1: Beispiel für die Bewertung dreier Ursachenkategorien mittels Nutzwertanalyse	28
Tabelle 2: Vernetzungsmatrix am Beispiel der Sichtbarkeit eines Signals	32
Tabelle 3: Übersicht über die Eigenschaften realer, komplizierter und komplexer Systeme nach VESTER und NINCK/BÜRKI/HUNGERBÜHLER/MÜHLEMANN	42
Tabelle 4: Charakteristik von komplizierten und komplexen Problemen im Vergleich	50
Tabelle 5: Übersicht über die ausgewählten Ereignisse mit komplexem Hintergrund. Die Bewertung erfolgt zu den drei Kriterien Ursachen, Auswirkungen und wirkungslose Barrieren. Relevante Argumente erhalten den Wert 1 und sind rot markiert. Dabei wird sichtbar, dass bei den meisten Ereignissen die Kommunikation und die Wahrnehmung ursächlich beigetragen haben.	59
Tabelle 6: Die Gesamtzahl der Signalfälle steigt an. Immerhin sind innerhalb von zwei Jahren 15% mehr Signalfälle zu verzeichnen	67
Tabelle 7: Einflussmatrix mit den gegenseitigen Einwirkungen zwischen den Systemelementen des Eisenbahn-Systemmodells der vorliegenden Arbeit	74
Tabelle 8: Interpretation der Systemelemente bezüglich ihrer Aktivität und Vernetzung sowie ihrer Eigenschaften auf Systemebene bei Veränderungen	76
Tabelle 9: Informationsaustausch zwischen Simulationsprogramm und Middleware für die Modellierung Integration der Stellwerklogik	84
Tabelle 10: Übersicht über die im Forschungslabor angewandten Instrumente mit ihrem Zweck und den erwarteten Ergebnissen	87
Tabelle 11: Vergleich von drei verschiedenen Videoaufzeichnungen für das Instrument QRailScan auf der Strecke Bern - Langnau - Entlebuch - Luzern	92
Tabelle 12: Zusammenstellung der zeitlichen Aufwändungen für das Erfassen von Infrastrukturdaten mit dem Instrument QRailScan	95
Tabelle 13: Ausschnitt eines Datensamples des Fahrtrainers Re 460 FASI. In der ersten Spalte sind die Sekunden 542 bis 568 nach Übungsstart aufgeführt. In den restlichen Spalten ist die Struktur und Beschaffenheit der im Sekundentakt erhobenen Daten erkennbar	102
Tabelle 14: Übersicht über die Auswahl der drei für die vorliegende Untersuchung relevanten Simulatoren. Eine erste Gegenüberstellung zeigt die grossen Unterschiede in der Beschaffenheit, besonders zwischen den Simulatoren FASI im Vergleich mit LOCSIM und ZUSI 3	105
Tabelle 15: Nutzwertanalyse zum Vergleich der Geländevisualisierungen der Fahrtrainern LOCSIM, FASI und ZUSI. Die Bewertungsskala entspricht dem schweizerischen Schulnoten	108
Tabelle 16: Zusammenstellung der zeitlichen Aufwändungen für die Modellierung der Teststrecke Emmenmatt/Zollbrück - Langnau mit verschiedenen Simulatoren.....	110
Tabelle 17: Übersicht über die Struktur der Fragebogen „Ergonomie und Betrieb“ Q4.1 sowie „Anwendung von Simulatoren“ Q4.2 für die quantitative Datenerhebung bei den Lokführerinnen und Lokführern anlässlich der Fallstudien auf den Simulatoren im Forschungslabor.....	121

Tabelle 18: Verzeichnis der Dilemmata für die Versuchsfahrt auf der Strecke Olten - Brugg, s. a. Drehbuch für Übung DESM-01-OL-BGG im Anhang	123
Tabelle 19: Verzeichnis der Dilemmata für die Versuchsfahrt auf der Strecke Baden - Zürich HB, s. a. Drehbuch für Übung DESM-02-BAD-ZUE im Anhang	130
Tabelle 20: Struktur der leistungsbeeinflussenden Faktoren für die Untersuchung der menschlichen Zuverlässigkeit.....	137
Tabelle 21: Einteilung der Probanden in zwei Gruppen für die Datenerhebung mittels SA- Performanz und SA-Selbsteinschätzung	137
Tabelle 22: Abstraktes Beispiel für die Analyse des Prozesses Wahrnehmung, Entscheidung, Handlung bei der Annäherung an ein Halt zeigendes Hauptsignal nach der Vorbeifahrt an einem Warnung zeigenden Vorsignal.	143
Tabelle 23: Chancen und Risiken für den Aufbau eines Eisenbahn-Systemmodells mit Fokus auf simulationsbasierte Anwendungen im Forschungslabor	149
Tabelle 24: χ^2 -Verteilungstest der Stichprobe aus den Fallstudien	160

Abkürzungen

AdL	Adaptive Lenkung
Ae	Typenbezeichnung für elektrische Lokomotiven (V/max 125 km/h)
BAV	Bundesamt für Verkehr (Schweizerische Eidgenossenschaft)
BFH	Berner Fachhochschule
BLOB	Binary Large Objects
BLS	Bern - Lötschberg - Simplon (Integriertes Eisenbahnunternehmen)
BZ	Betriebszentrale
CT	cute (C++ Klassenbibliothek)
DB	Deutsche Bahn
DESM	Dynamisches Eisenbahn System Modell
DfA	Datenbank feste Anlagen
DLL	Dynamic Link Library
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
DV	Digital Video
DOLS	Dispositive Operative Leitstelle Spiez
EBG	Eisenbahngesetz
EBT	Emmental - Burgdorf - Thun - Bahn
EBV	Eisenbahnverordnung
ECL	Ereignis-Checkliste
ETCS	European Train Control System
EWLV	Einzelwagenladungsverkehr
ETHZ	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
EVU	Eisenbahnverkehrsunternehmen
EW	Einheitswagen
Fdl (FDL)	Fahrdienstleiter
FDV	Fahrdienstvorschriften (Schweizerische Eisenbahnen)
FHNW	Fachhochschule Nordwestschweiz
Fst	Führerstand
GBT	Gotthard-Basistunnel
GeoIG	Geoinformationsgesetz
GIS	Geografisches Informationssystem
GSM-R	Global System for Mobile Communications - Rail
GUI	Graphical User Interface
HD	High Definition Video
Hg	Höchstgeschwindigkeit
HMI	Human Machine Interface
Hp	Signalbegriff eines deutschen Hauptsignals
HRA	Human Reliability Assessment oder Human Reliability Anlysis
ISB	Infrastrukturbetreiber
IVA	Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik

IVT	Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme
Lf (LF)	Lokführer
LBT	Lötschberg-Basistunnel
MAZ	Mechanisiertes Ausbildungszentrum
OWL	Web Ontology Language
PMS	Permanentmagnetschienenbremse
PNML	Petri Net Markup Language
railML	rail Markup Language
Re	Typenbezeichnung für elektrische Lokomotiven (erhöhte Kuvengeschwindigkeit)
RE	Regionalexpress
RM	Regionalverkehr Mittelland AG
RV	Betriebsart Reversing beim ETCS
SART	Situation Awareness Rating Technique
SBB	Schweizerische Bundesbahnen
SD	System Dynamics
SOB	Schweizerische Südostbahn AG
SPAD	Signal Passed At Danger
SQL	Structured Query Language
Stw	Stellwerk
SUST	Schweizerische Unfalluntersuchungsstelle
TEL	TELOC (Geschwindigkeitsmesser) oder Telefon
THURBO	Thurgau - Bodensee (Integriertes Eisenbahnunternehmen)
Tm	Typenbezeichnung für leichte Triebfahrzeuge mit thermischem Antrieb
UIC	Union Internationale des Chemins de Fer
UUS	Unfalluntersuchungsstelle für Bahnen und Schiffe
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VES	Vereinigte Signalwerke (ehemaliger Stellwerk-Hersteller)
VUU	Verordnung über die Unfalluntersuchung
XML	Extensible Markup Language
ZB	Zentralbahn
ZFK	Zugfunk
ZLR	Zuglaufrechnung (ehemaliges Werkzeug der SBB)
ZSW	Zentralstellwerk
ZUB	Zugbeeinflussung
Zvl (ZVL)	Zugverkehrsleiter

Glossar

Abfertigungs-/Abfahrtsprozess	Alle Massnahmen und Tätigkeiten ab dem Vorliegen der technischen Abfahrbereitschaft bei gesicherter Fahrstrasse für die Ausfahrt eines Zuges aus einem Bahnhof, bis zu dessen Abfahrt.
Anfangssignal	Signal, welches den Beginn einer Langsamfahrstelle mit der am Vorsignal signalisierte Geschwindigkeit bezeichnet.
Anhängelast	Das Gesamtgewicht der Wagen und der geschleppten Triebfahrzeuge, in Tonnen (t). (BUNDESAMT FÜR VERKEHR, 2012: 32)
Anschlussgleis	Das an einen Bahnhof oder an die Strecke angeschlossene Gleis für Industrieanlagen und Lagerplätze. (BUNDESAMT FÜR VERKEHR, 2012: 33)
Ausfahrtsignal	Letztes in Richtung Strecke führendes Hauptsignal im Bahnhof. (BUNDESAMT FÜR VERKEHR, 2012: 33)
Betriebsführung	Regelung und Sicherung des Zugverkehrs...
Bremsgewicht	Wert in Tonnen (t), um die Bremskraft eines Fahrzeuges auszudrücken. (BUNDESAMT FÜR VERKEHR, 2012: 34)
Bremsprobe	Die Massnahmen und Tätigkeiten gemäss Fahrdienstvorschriften, um vor der Abfahrt eines Zuges die genügende Wirkung der Bremsen festzustellen.
Bremsreihe	ein festgelegtes Bremsverhältnis, für das auf Grund der vorhandenen Vorsignalentfernung und der Neigung der Strecke die zulässige Höchstgeschwindigkeit bestimmt und in der Streckentabelle bekannt gegeben wird. (BUNDESAMT FÜR VERKEHR, 2012: 34)
Bremsverhältnis	Die Wirksamkeit der Bremsen eines Fahrzeuges oder eines Zuges, in Prozenten (%). (BUNDESAMT FÜR VERKEHR, 2012: 34)
Einfahrtsignal	erstes zum Bahnhof gehörendes Hauptsignal. Es bezeichnet die Grenze zwischen Strecke und Bahnhof. (BUNDESAMT FÜR VERKEHR, 2012: 35)
Eisenbahnunternehmen	der Eisenbahngesetzgebung unterstellte natürliche oder juristische Personen (exkl. Busse, Trolleybusse, Seilbahnen). (BUNDESAMT FÜR VERKEHR, 2012: 35)
Eisenbahnverkehrsunternehmen	Eisenbahnunternehmen in der Funktion Verkehr zu betreiben, was insbesondere die Traktion beinhaltet. (BUNDESAMT FÜR VERKEHR, 2012: 35)
Endsignal	Signal, welches das Ende einer Langsamfahrstelle mit der am Vorsignal signalisierten Geschwindigkeit bezeichnet. Es gilt die Streckengeschwindigkeit nach Vorbeifahrt des letzten Fahrzeuges.

Entpannung	Fachbegriff aus der Bedienungsvorschrift der SBB-Lokomotive vom Typ Re 460, indem der Lokführer mit Hilfe des Diagnosesystems eine aufgetretene Fahrzeugstörung (Panne) beheben kann.
Fahrbegriff	Signalbild mittels einzelner oder einer Kombination von Signallampen an Vor- und Hauptsignalen, welches dem Lokführer die ab Hauptsignal gültige Höchstgeschwindigkeit signalisiert.
Fahrt auf Sicht	den Sichtverhältnissen angepasste Fahrgeschwindigkeit, höchstens 40 km/h, sodass rechtzeitig vor einem auf Sichtdistanz erkennbaren Hindernis angehalten werden kann. In Einzelfällen sehen die spezifischen hoheitlichen Vorschriften abweichende Höchstgeschwindigkeiten vor. 36)
Geschwindigkeitsschwelle	Die Stelle, an der die vorgeschriebene Geschwindigkeit ändert. (BUNDESAMT FÜR VERKEHR, 2012: 37)
Gleissignal	Gleisabschnittsignal oder Ausfahrtsignal, das für ein einzelnes Gleis gilt. (BUNDESAMT FÜR VERKEHR, 2012: 38)
Gruppensignal	Gleisabschnittsignal oder Ausfahrtsignal, das für mehrere Gleise gilt. (BUNDESAMT FÜR VERKEHR, 2012: 38)
Hektometertafel	Signal auf der Strecke, welches die Entfernung ab einem Referenznullpunkt in Kilometer und Hektometer anzeigt.
INTEGRA	Ehemaliger Hersteller von Eisenbahnsicherungsanlagen in der Schweiz (heute SIEMENS).
iglos	Intelligentes Glossar und gleichzeitig ein Projekt, ein Softwarepaket und eine Theorie zu semantischen Netzen am Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik der Technischen Universität Braunschweig. (https://www.iglos.de/doc/ , 03.02.2014)
Langsamfahrstelle	Abschnitt einer Strecke oder eines Bahnhofs, welcher vorübergehend nur mit eingeschränkter Geschwindigkeit befahren werden darf.
Matlab	Höhere Programmiersprache und interaktive Umgebung für numerische Berechnungen, Visualisierung und Programmierung. (http://www.mathworks.ch/products/matlab/ , 03.02.2014)
MatWorks	Amerikanisches Softwareunternehmen für technische Berechnungen.
Neigungszeiger	Signal auf der Strecke, welches das Gefälle oder die Steigung einer Strecke, in Promille (‰) anzeigt.
Notbedienung	Einrichtung, mit der bei Störung oder im Notfall in die Sicherungsanlage eingegriffen oder ein Teilbereich der Sicherungsanlage umgangen werden kann. (BUNDESAMT FÜR VERKEHR, 2012: 40)

Notbremsung	Auslösen einer Schnellbremsung durch den Lokführer im Führerstand oder durch den Zugpersonal oder Passagiere im Zug infolge einer Gefahrensituation.
Rangierbewegung	Alle Fahrzeugbewegungen im Bahnhof, in Werkstätten, Depotanlagen, Anschlussgleisen und auf der Strecke, die nicht als Zugfahrten ausgeführt werden können. (BUNDESAMT FÜR VERKEHR, 2012: 40)
Rangierfahrstrasse	Betrieblich und technisch gesicherter Fahrweg für Rangierbewegungen.
Rangierleiter	Bediensteter, welcher die Rangierbewegung bestimmt und leitet. (BUNDESAMT FÜR VERKEHR, 2012: 41)
Schnellbremsung	Aufbau der schnellst möglichen Wirkung der Druckluftbremse aller mit der Bremse verbundenen Fahrzeuge durch Entleeren der Hauptleitung.
Schutzstrecke	Spannungsloser Abschnitt der Fahrleitung zwischen zwei Speisebezirken von Unterwerken. Das Befahren von Schutzstrecken ist in den Fahrdienstvorschriften und mittels Signalen geregelt.
Speisebezirk	Alle Fahrleitungen einer Region, die von einem Unterwerk mit Strom versorgt werden.
Streckengeschwindigkeit	Die nach Streckentabelle und gemäss der für den betreffenden Zug gültigen Bremsreihe höchste erlaubte Geschwindigkeit.
V-Ankündigung	Bild eines Lichtsignals, welches die ab dem nächsten Hauptsignal gültige Höchstgeschwindigkeit signalisiert.
V-Ausführung	Bild eines Hauptsignals, welches die sofort gültige Höchstgeschwindigkeit signalisiert.
vbbLabeler	Elektronisches Programm für Anwendungen im Bereich der Photogrammetrie.
Zug	einzelne oder zusammengekuppelte Triebfahrzeuge mit oder ohne Wagen, die auf die Strecke übergehen, und zwar vom Zeitpunkt ihrer Übernahme durch das Fahrpersonal auf dem Abfahrgleis des Ausgangsortes bis zu ihrer Ankunft auf dem Ankunftsgleis des Bestimmungsortes, ausgenommen während Rangierbewegungen. (BUNDESAMT FÜR VERKEHR, 2012: 44)
Zugfahrstrasse	Betrieblich und technisch gesicherter Fahrweg für Züge.
Zugverkehrs-/Fahrdienstleiter	Der Verantwortliche für die Sicherung und Regelung des Zugverkehrs und der Rangierbewegungen. (BUNDESAMT FÜR VERKEHR, 2012: 36)
Zwergsignal	Schweizerisches Lichtsignal für die Regelung und Sicherung primär von Rangierfahrstrassen. Sie müssen auch in Zugfahrstrassen von den Lokführern beachtet werden.

Literatur

- ALBERS Sönke/KLAPPER Daniel/KONRADT Udo et al, 2006: Methodik der empirischen Forschung. 1. Auflage. Deutscher Universitätsverlag. GWV Fachverlage GmbH. Wiesbaden.
- ANTONI Marc, 2009: Petrinetzbasierte Validierung von Eisenbahnsicherungssystemen. Dissertation der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Braunschweig.
- BAHRENBURG Gernhard/GIESE Ernst/NIPPER Josef, 1999: Statistische Methoden in der Geographie. Band 1. Univariate und bivariate Statistik. Teubner. Stuttgart.
- BARMETTLER Christian, 2012: Fotogalerie Fahrtage beim DVZO vom 19. August und 2. September 2012. <http://www.chriguseisenbahnseiten.ch/dvzo.html>, 08.02.2014.
- BELLOTTO Giorgio, 2004: DfA das zentrale GIS der SBB. In: Geomatik Schweiz 12/2004, webartig.ch (724-729). Thalwil.
- BRABAND Jens, 2011: Schlüsselrolle für die Sicherheit des Systems Bahn. In: Deine Bahn 11/2011. Bahn Fachverlag GmbH. Berlin.
- BRÜNGGER Jonas, 2011: Was macht einen Zugverkehrsleitenden zum Experten? In: Signal+Draht 11/2011. DVV Media Group GmbH. Eurailpress. Hamburg.
- BULD Susanne/KRÜGER Hans-Peter, 2003: Die Auswirkung von Teilautomation auf das Fahrverhalten. In: Entscheidungsunterstützung für die Fahrzeug und Prozessführung. DGLR-Bericht 2003/04. Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt - Lilienthal-Oberth e.V. Bonn.
- BUNDESAMT FÜR STATISTIK, 2013: Öffentlicher Verkehr (inkl. Schienengüterverkehr). 11 Mobilität und Verkehr. Zeitreihen 1990, 1995, 2000 - 2012. <http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/11/07/blank/01/01.html>, 31.01.2014
- BUNDESAMT FÜR VERKEHR, 2012: Schweizerische Eisenbahnen. Schweizerische Fahrdienstvorschriften FDV. (R 300.1-.15). SR 742.173.001. BBL, Verkauf Bundespublikationen. Bern.
- BUNDESAMT FÜR VERKEHR, 2013a: Elektronisches Werkzeug zur videobasierten Erhebung von Infrastrukturdaten: QRailScan. Handbuch. Referenz/Aktenzeichen: 176/2012-01-17/418. Bern.
- BUNDESAMT FÜR VERKEHR, 2013b: Schweizerische Eidgenossenschaft. Signalfälle 2010 - 2012. Analyse. Referenz/Aktenzeichen: 521/2013-03-22/66. Bern.
- BUTZ Rudolf W., 1976: Signale der Schweizer Bahnen. Orell Füessli Verlag. Zürich.
- DÖRNER Dietrich, 2014: Die Logik des Misslingens. 12. Auflage. Rowohlt Verlag GmbH. Reinbek bei Hamburg.
- EGLI Hans-Rudolf; MESSERLI Paul, 2003: Zur geopolitischen und geoökologischen Interpretation der Alpen als Brücke, Grenze und Insel. In: Welt der Alpen, Ressourcen - Akteure - Perspektiven. Bern.
- EIDGENÖSSISCHES DEPARTEMENT FÜR UMWELT, VERKEHR, ENERGIE, UND KOMMUNIKATION, 2013: Ausführungsbestimmungen zur Eisenbahnverordnung (AB-EBV). gestützt auf Art. 81 der Eisenbahnverordnung vom 23. November 1983. Hrg.: Bundesamt für Verkehr. Bern.
- ENDSLEY Mica R., 1995: Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems. In: Human Factors 1995 37(1), 32-97. <http://uwf.edu/skass/documents/HF.37.1995-Endsley-Theory.pdf>, 13.01.2014.

- ENDSLEY Mica R., 1998: A comparative analysis of SAGAT and SART for evaluations of situations of Situation Awareness. 42nd Annual Meeting of the Human Factors & Ergonomics Society. Chicago.
- ENDSLEY Mica R./BOLTÉ Betty/JONES Debra G., 2003: Designing for Situation Awareness. An Approach to User-Centered Design. Taylor & Francis Inc. New York.
- FISCHER Kathrin, 2010: Entwicklung eines Situation Awareness Trainings für Lokführer. In: Verband Deutscher Eisenbahningenieure e.V. (Hrsg.), EIK - Eisenbahn Ingenieur Kalender 2010 (243-250). Eurailpress. Hamburg.
- FLICK Uwe, 2002: Qualitative Sozialforschung. Eine Einführung. Rowohlt Taschenbuch Verlag GmbH. Reinbek bei Hamburg.
- GERKE Carsten/BLEIDISSLER Joachim/LODEMAN Michael/LUTTENBERGER Norbert, 2012: XML-Schemata zum Datenaustausch im Planungsprozess von elektronischen Stellwerken. In: Eisenbahntechnische Rundschau ETR Nr. 3, März 2012 (48-51). Eurailpress. Hamburg.
- GLINZ Martin, 2005: Informatik II Modellierung. Kapitel 2. Einführung in die Modelltheorie. Institut für Informatik der Universität Zürich.
- GRAF F., 1955: Signale und Sicherungseinrichtungen. In: Die Geheimnisse der Eisenbahn. Verlag für Wissenschaft, Technik und Industrie AG. Basel.
- HAMMERL Malte/FELMANN Frederike, 2009: Rail Human Factors - Menschliche Einflussfaktoren im Eisenbahnsystem. In: ZEVrail 133 (2009), S. 314 - 321. Georg Siemens Verlag GmbH & Co. KG. Berlin.
- HAMMERL Malte, 2011: Analyse der menschlichen Einflussfaktoren und Zuverlässigkeit im Eisenbahnverkehr. Dissertation. Fakultät für Maschinenbau der TU Braunschweig.
- HÄMMERLI R., 1982: Die Grundsätze der Sicherungsanlagen für den Eisenbahnbetrieb. Band 1. Die Anlagen im Gleisfeld. SBB Kr I VI 82 1500. Schweizerische Bundesbahnen. Bern.
- HÄMMERLI R., 1983: Die Grundsätze der Sicherungsanlagen für den Eisenbahnbetrieb. Band 2. Die zentralen Stellwerkanlagen. SBB Kr I VII 83 1500. Schweizerische Bundesbahnen. Bern.
- HECHT Markus/JÄNSCH Eberhart/LANG Hans Peter/LÜBKE Dietmar et. al., 2008: Das System Bahn. Handbuch. DVV Media Group GmbH. Hamburg
- HÖLSCHER Carsten, 2013: Zusi - Der Zugsimulator. Dokumentation. Kommerzielle Version. Braunschweig.
- HÜRLIMANN Daniel, 2001: Objektorientierte Modellierung von Infrastrukturelementen und Betriebsvorgängen im Eisenbahnwesen. Dissertation. ETH Zürich.
- JONES D.G./ENDSLEY M.R., 1996: Sources of Situation Awareness Errors in Aviation. In: Aviation, Space and Environmental Medicine. Volume 67. Aerospace Medical Association. Alexandria.
- JURA-SIMPLON-BAHN, 1900: Instruktion betreffend den Dienst der Signalstation Obermatt und den Zugverkehr auf der Gemeinschaftsstrecke Obermatt - Langnau. 2. Auflage. Buchdruckerei Lack Aeschlimann & Jost. Bern.
- KOLMORGEN Vasco Paul, 2013: UIC und railML® legen den Grundstein für ein universelles Format zum Austausch von Infrastrukturdaten. <http://railml.org//index.php/nachrichtenleser/items/uic-railml-24konferenz-infrastrukturdaten.html>. Ohne Ortsangabe.
- KRAUSS-MAFFEI WEGMANN, 1999: Fahr Simulator SBB Lok Re 460. Schweizerische Bundesbahnen. Dokumentation Instruktor. München.

- KRAUSS-MAFFEI WEGMANN, 2012: Konfiguration Fahr Simulator Re 460 SBB. München.
- KÜPPERS Günter/LENHARD Johannes/SHINN Terry, 2006: Computer Simulation: Introductory Essay. In: Simulation - Pragmatic Construction of Reality (3-22). Springer. Dordrecht.
- LANE David C., 2000: Should System Dynamics be Described as a ‚Hard‘ or ‚Deterministic‘ Systems Approach? In: System Research and Behavioral Science 17, 3-22 (2000). International Federation of System Research. Wien.
- LEHMANN Martin/ALBRECHT Thomas, 2008: Bericht „Erarbeitung eines XML-basierten Schemas zur Darstellung der sicherungstechnischen Streckenausrüstung in einem Fahr Simulator.“ Basierend auf einer Hauptseminararbeit von Martin Lehmann. Institut für Verkehrstelematik. Technische Universität Dresden.
- LITRA Informationsdienst für den öffentlichen Verkehr, 2011: Schienennetz Schweiz. Eisenbahn-Infrastrukturunternehmen. Stand Anfang 2011. Diplomy Verlag. Grafenried.
- LITRA Informationsdienst für den öffentlichen Verkehr, 2013: Verkehrszahlen Ausgabe 2013. Bern.
- LODEMANN Michael/GERKE Carsten/LUTTENBERGER Norbert 2010: Beschreibung von Eisenbahninfrastrukturen mit railML und ihre Verifikation. In: Signal und Draht 4/2010. DVV Media Group GmbH/Eurailpress. Hamburg.
- LÜTHI Marco, 2009: Improving the Efficiency of Heavily Used Railway Networks through Integrated Real-Time Rescheduling. Dissertation. ETH Zürich.
- MELNIK Gina, 2013: Mobile Locomotive Simulator for Human Factors Research. The Federal Railroad Administration’s Cab Technology Integration Laboratory. In: TR NEWS 286 May–June 2013. Transportation Research Board. Washington.
- MERINA A., 1978: Matthias Hipp 1813-1893 und die Hipp’sche Wendescheibe. Vogel Buchhandlung AG Winterthur. Wallisellen.
- MEYER ZU HÖRSTE Michael/SLOVAK Roman/SCHNIEDER Eckehard, 2001: Modellierung und Simulation von Eisenbahnleit- und -sicherungssystemen auf Basis generischer Funktionen. Tagungsband des 8. Internationalen Symposiums Zel 2001. Zilina
- MEYER ZU HÖRSTE Michael, 2003: Methodische Analyse und generische Modellierung von Eisenbahnleit- und -sicherungssystemen. Dissertation. Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik. TU Braunschweig.
- MÖHLENBRINK Christoph, 2010: Modellierung und Analyse von menschlichen Entscheidungsheuristiken mit farbigen Petrinetzen. Dissertation. Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik. TU Braunschweig.
- MÜLLER Jens-Olaf, 1996: Entwurf einer optimalen Mensch-Prozess-Kommunikation für einen Dispositionsarbeitsplatz im Magnet-Schnellbahn-Verkehr. Dissertation. Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik. TU Braunschweig.
- MÜLLER Kai, 1998: Verkehr in systemtechnischer Darstellung und ihre Anwendung auf ein multimodales Güterverkehrskonzept. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12: Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik. VDI Verlag GmbH. Düsseldorf.
- MÜLLER Hansruedi, 1999: Tourismus und Ökologie. Wechselwirkungen und Handlungsfelder. Forschungsinstitut für Freizeit und Tourismus (FIF) der Universität Bern.
- NINCK Andreas/BÜRKI Leo/HUNGERBÜHLER Roland/MÜHLEMANN Heinrich, 2004: Systemik. Vernetztes Denken in komplexen Situationen. 4. Auflage. Orell Füessli Verlag, Zürich.
- PACHL Jörn, 2008: Systemtechnik des Schienenverkehrs. Bahnbetrieb planen, steuern und sichern. 5. bearbeitete und erweiterte Auflage. Vieweg+Teubner. GWV Fachverlage GmbH. Wiesbaden.

- PACHL Jörn, 2011: Sicherer Bahnbetrieb gestern und heute. In: Deine Bahn 11/2011. Bahn Fachverlag GmbH. Berlin.
- RIEDER Markus, 2005: Regionalisierung des Schienenverkehrs in der Schweiz. Gewinner und Verlierer unter den Aspekten der Angebotsqualität und der Finanzierung. Das Schweizer Modell im Verleich zu Belgien und Frankreich. Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme. ETH Zürich.
- RIEDWYL Hans, 1978: Angewandte mathematische Statistik in Wissenschaft, Administration und Technik. Verlag Paul Haupt. Bern.
- REASON James, 2008: The Human Contribution. Unsafe Acts, Accidents and Heroic Recoveries. Ashgate Publishing Limited. Farnham.
- RIESEN Fabian, 2012: DESM-Dispatcher. In: Forschungslabor für ein Dynamisches Eisenbahn Systemmodell. Präsentation vom 4. September 2012 (28-30). <http://www.desm.ch/index.php?page=1120>, 15.10.2013
- SALZGEBER Roman, 2013: Detektion von Eisenbahnsignalen in Videos. Bachelorarbeit Studiengang Geomatik und Planung. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie. ETH Zürich.
- SCHÄTZL Ludwig, 1992: Wirtschaftsgeographie 1. Theorie. 4. überarbeitete und erweiterte Auflage. Verlag Ferdinand Schöningh. Paderborn.
- SCHMID Lukas, 2011: Erfolgodynamik - Ein Konzept für die Erstellung systemdynamischer Modelle zur Entscheidungsunterstützung im strategischen Management. Dissertation. Hochschule für Wirtschafts-, Rechts- und Sozialwissenschaften sowie Internationale Beziehungen (HSG). Universität St. Gallen.
- SCHNIEDER Eckehard, 1993: Prozessinformatik. Automatisierung mit Rechensystemen. Einführung mit Petrinetzen. Friedrich Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/Wiesbaden.
- SCHNIEDER Eckehard, 1999: Methoden der Automatisierung. Beschreibungsmittel, Modellkonzepte und Werkzeuge für Automatisierungssysteme. Springer Vieweg. Ohne Ortsangabe.
- SCHNIEDER Eckehard, 2007: Verkehrsleittechnik. Automatisierung des Strassen- und Schienenverkehrs. Springer-Verlag, Berlin.
- SCHNIEDER Eckehard/SCHNIEDER Lars, 2010: Terminologische Präzisierung des Systembegriffs. Grundlage formaler Systembeschreibungen. In: atp edition 9/2011. Deutscher Industrieverlag GmbH. München.
- SCHNIEDER Eckehard/SCHNIEDER Lars, 2013: Verkehrssicherheit. Masse und Modelle, Methoden und Massnahmen für den Strassen- und Schienenverkehr. Springer Vieweg. Ohne Ortsangabe.
- SCHNIEDER Lars, 2009: Formalisierte Terminologien technischer Systeme und ihrer Zuverlässigkeit. Dissertation. Technische Universität Braunschweig.
- SCHUMANN Matthias, 2004: Arbeitsbericht 25/2004, Forschungsasätze. Institut für Wirtschaftsinformatik, Georg-August-Universität, Göttingen.
- SCHWAGER Mirjam, 2013: Risiken der Automatisierung für die Zusammenarbeit von Lokführer und Zugverkehrsleiter - Lösungsansätze für die Entwicklung eines gemeinsamen Verständnisses. Bachelorarbeit. Fachhochschule Nordwestschweiz, Olten.
- SCHWARTZ Stefanie/HAMMER Malte/FELDMANN Frederike, 2009: Quantifizierung menschlicher Fehler für Risikoanalysen. In: Signal+Dracht 6/2009. DVV Media Group GmbH. Eurailpress. Hamburg.

- SCHWEIZER ARMEE, 2004: Taktische Führung XXI. Reglement 51.020 d. Eidgenössisches Departement für Verteidigung, Bevölkerungsschutz und Sport. Bern.
- SCHWEIZERISCHE BUNDESBAHNEN SBB, 1938: Station Emmenmatt und Signalstation Obermatt. Sicherungsanlagen. Gleispläne und Verschlussstabellen. Kreisdirektion II, Luzern.
- SCHWEIZERISCHE BUNDESBAHNEN SBB, 1943: Statistik über Stellwerkanlagen. SBB Kreis II. Strecke Bern - Luzern. SA5. Luzern.
- SCHWEIZERISCHE BUNDESBAHNEN SBB, 2012: Vufflens-la-Ville. Analyse der Ereignisse vom 19.09.2012. Infrastruktur Sicherungsanlagen. Bern.
- SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT, 1983: Verordnung über Bau und Betrieb der Eisenbahnen (Eisenbahnverordnung, EBV). Stand 1. Juli 2013. SR 742.141.1. Schweizerischer Bundesrat. Bern.
- SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT, 2000: Verordnung über die Meldung und die Untersuchung von Unfällen und schweren Vorfällen beim Betrieb öffentlicher Verkehrsmittel (Unfalluntersuchungsverordnung, VUU). Stand 1. November 2011. SR 742.161. Schweizerischer Bundesrat. Bern.
- SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT, 2007a: Bundesgesetz über Geoinformation. (Geoinformationsgesetz, GeoIG). Stand 1. Oktober 2009. SR 510.62. Bundesversammlung der Schweizerischen Eidgenossenschaft. Bern.
- SCHWEIZERISCHE UNFALLUNTERSUCHUNGSSTELLE SUST, 2012a: Schlussbericht über Beinaheunfall zwischen S-Bahn Zug 21223 und ICN 10012 vom Samstag 15. Oktober 2011 in Altdorf UVEK. Bern.
- SCHWEIZERISCHE UNFALLUNTERSUCHUNGSSTELLE SUST, 2012b: Schlussbericht über Zugskollision bei der RhB vom 22. November 2011 in Rueun GR UVEK. Bern.
- SCHWEIZERISCHE UNFALLUNTERSUCHUNGSSTELLE SUST, 2012c: Schlussbericht über Zuggefährdung vom 24.11.2011 in Thun UVEK. Bern.
- SCHWEIZERISCHE UNFALLUNTERSUCHUNGSSTELLE SUST, 2013: Schlussbericht über die Kollision eines Güterzugs mit einem Lokzug vom Mittwoch, 27. Februar 2013 in Basel Bad Bf. UVEK. Bern.
- SERVICE D'ENQUÊTE SUISSE SUR LES ACCIDENTS SESA, 2012a: Rapport final sur la mise en danger du personnel CFF lors de travaux du mardi 17 avril 2012 entre Bienne et Madretsch (km 32.500). UVEK. Bern.
- SERVICE D'ENQUÊTE SUISSE SUR LES ACCIDENTS SESA, 2012b: Rapport final sur la mise en danger de l'exploitation du mardi 8 mai 2012 à Schmitten. UVEK. Bern.
- SERVICE D'ENQUÊTE SUR LES ACCIDENTS DES TRANSPORTS PUBLICS, 2007: Rapport final sur la mise en danger de trains du mercredi 7 septembre 2006 à Monthey. UVEK. Bern.
- SERVICE D'ENQUÊTE SUR LES ACCIDENTS DES TRANSPORTS PUBLICS, 2009a: Rapport final sur la collision lors d'un mouvement de manoeuvre entre une automotrice et des wagons chargés sur bogies transporteurs le samedi 4 octobre 2008 à Apples (MBC). UVEK. Bern.
- SERVICE D'ENQUÊTE SUR LES ACCIDENTS DES TRANSPORTS PUBLICS, 2009b: Rapport final sur la situation dangereuse du mardi 21 juillet 2009 à Noiraigue NE. UVEK. Bern.
- SERVICE D'ENQUÊTE SUR LES ACCIDENTS DES TRANSPORTS PUBLICS, 2010a: Rapport final sur la Collision de train du mercredi 19 Août 2009 à Les Echenards VD. UVEK. Bern.

- SERVICE D'ENQUÊTE SUR LES ACCIDENTS DES TRANSPORTS PUBLICS, 2010b:
Rapport final sur la mise en danger de l'exploitation du mercredi 30 juin 2010 à Montreux
CFF. UVEK. Bern.
- SERVICE D'ENQUÊTE SUR LES ACCIDENTS DES TRANSPORTS PUBLICS, 2011a: Rap-
port final sur la collision frontale de 2 trains voyageurs du 27 août 2010 à en aval de la gare de
Plambuit sur la ligne de l'ASD. UVEK. Bern.
- SERVICE D'ENQUÊTE SUR LES ACCIDENTS DES TRANSPORTS PUBLICS, 2011b: Rap-
port final sur la prise en écharpe du mercredi 15 septembre 2010 à St-Maurice. UVEK. Bern.
- SERVICE D'ENQUÊTE SUR LES ACCIDENTS DES TRANSPORTS PUBLICS, 2011c:
Rapport final sur la mise en danger du personnel de CFF- Infra lors de travaux du jeudi 16
décembre 2010 à Lutry. UVEK. Bern.
- SERVICE D'ENQUÊTE SUR LES ACCIDENTS DES TRANSPORTS PUBLICS, 2011: Rap-
port final sur la mise en danger du personnel lors de travaux du vendredi 8 avril 2011 à Rosé.
UVEK. Bern.
- SERVIZIO D'INCHIESTA SUGLI INFORTUNI DE TRASPORTI PUBBLICI, 2004: Rapporto
finale relativo al pericolo potenziale rappresentato da un rubinetto d'accoppiamento della
condotta generale in posizione inter-media sul treno 40016 (BLS) Lugano - Lamone. Martedì
20 gennaio 2004. UVEK. Bern.
- SPATH Christiane, 2009: Simulationen. Begriffsgeschichte, Abgrenzung und Darstellung in
der wissenschafts- und technikhistorischen Forschungsliteratur. Masterarbeit. Historisches
Institut. Abteilung für Geschichte der Naturwissenschaft und Technik. Universität Stuttgart.
- STEIN Christian/SCHNIEDER Lars 2009: Terminologieverwaltungssysteme - neue Wege durch
den Fachwordtschungel. Mitteilungen für Dolmetscher und Übersetzer (3). S.24-27. Bundes-
verband der Dolmetscher und Übersetzer. Saarbrücken.
- STOLLER Nicole, 2013: Situation Awareness von Lokführenden während sicherheitskritischer
Ereignissen im Bahnverkehr. Bachelorarbeit. Fachhochschule Nordwestschweiz, Olten.
- STRAUBE Sebastian, 2013: DESM Middleware. Spezifikation v.14. Ohne Ortsangabe.
- STRÄTER Oliver/ARENIUS Marcus/ATHANASSIOU Geogios, 2011: Zuverlässigkeitsbetrach-
tungen im Eisenbahnbetrieb. In: Deine Bahn 11/2011. Bahn Fachverlag GmbH. Berlin.
- STRÄTER Oliver/ARENIUS Marcus, 2012: Menschliche Zuverlässigkeit im Eisenbahnbetrieb.
Mensch-Technik-Wechselwirkungen. In: Deine Bahn 6/2012. Bahn Fachverlag GmbH. Berlin.
- SUTER Jürg, 2005: Isochronenkarten von 1750, 1870 und 1910 ab Bellinzona. Seminararbeit am
Geographischen Institut der Universität Bern. Gruppe Siedlungsgeographie und Landschafts-
geschichte. Bern.
- SUTER Jürg, 2007: Inwertsetzung einer internationalen Bahnlinie durch die zentralen Pyrenäen.
Bedürfnis- und Umsetzungsstudie für den Personen- und Güterverkehr auf der Linie Zaragoza
- Canfranc - Pau. Diplomarbeit der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Uni-
versität Bern.
- SUTER Jürg, 2012: Untersuchungen mit einem dynamischen Eisenbahn-Systemmodell. In: EA
2/2012. Verlag Schweizer Eisenbahn-Amateur. Bühler Druck. Schwerzenbach.
- SUTER Jürg, STRAUBE Sebastian, RIESEN Fabian, 2012: Modelling a universal rail system
with a focus on interrelationships. In: FORMS/FORMAT. Institut für Verkehrssicherheit und
Automatisierungstechnik, Braunschweig.
- SUTER Jürg, 2013: Bericht über die Versuchsfahrten auf Simulatoren. <http://www.desm.ch>,
13.12.2013

- UNFALLUNTERSUCHUNGSSTELLE BAHNEN UND SCHIFFE UUS, 2003a: Schlussbericht über die Zuggefährdung in Biel SBB PB am Mittwoch, 30.07.2003. Bern.
- UNFALLUNTERSUCHUNGSSTELLE BAHNEN UND SCHIFFE UUS, 2003b: Schlussbericht über die Zuggefährdung im Bahnhof Burgdorf zwischen dem Güterzug 62406 und dem S-Bahn-Zug 16418 am Dienstag, 09. September 2003. UVEK. Bern.
- UNFALLUNTERSUCHUNGSSTELLE BAHNEN UND SCHIFFE UUS, 2004a: Schlussbericht über die Zuggefährdung von Regionalzug 8167 der THURBO AG bei der Blockstelle, Horchental zwischen Mörschwil und Goldach am Dienstag, 15.07.2003. UVEK. Bern.
- UNFALLUNTERSUCHUNGSSTELLE BAHNEN UND SCHIFFE UUS, 2004b: Schlussbericht über die Zuggefährdung zwischen den Zügen 8131 und 516 in Schwarzenbach SG am Dienstag, 09. Dezember 2003. UVEK. Bern.
- UNFALLUNTERSUCHUNGSSTELLE BAHNEN UND SCHIFFE UUS, 2004c: Schlussbericht über die Kollision im Bahnhof Oberwinterthur am Donnerstag, 10. Juni 2004. UVEK. Bern.
- UNFALLUNTERSUCHUNGSSTELLE BAHNEN UND SCHIFFE UUS, 2005: Schlussbericht über die Kollision zwischen einem Kieszug und einer Lok Ae 610 im Bahnhof Hüntwangen Wil (SBB) von Mittwoch, 20. April 2005. UVEK. Bern.
- UNFALLUNTERSUCHUNGSSTELLE BAHNEN UND SCHIFFE UUS, 2006a: Schlussbericht über den Beinaheunfall zwischen einem Regionalzug und einer Baugruppe im Bahnhof Tecknau (SBB) am Montag, 09. Mai 2005. UVEK. Bern.
- UNFALLUNTERSUCHUNGSSTELLE BAHNEN UND SCHIFFE UUS, 2006b: Schlussbericht über die Zuggefährdung vom 18.01.2006 und die Gefährdung vom 28.02.2006 in Solothurn. UVEK. Bern.
- UNFALLUNTERSUCHUNGSSTELLE BAHNEN UND SCHIFFE UUS, 2007a: Schlussbericht über die Kollision zwischen dem ICE Nr. 278 und einer unbegleiteten Rangierfahrt mit 2 Re 465 in Vst. von Freitag, 28. April 2006 in 3600 Thun BE. UVEK. Bern.
- UNFALLUNTERSUCHUNGSSTELLE BAHNEN UND SCHIFFE UUS, 2007b: Schlussbericht über den Aufprall eines Dienstzuges auf eine stehende Wagengruppe vom Mittwoch, 17. Mai 2006 in Dürrenast / Thun. UVEK. Bern.
- UNFALLUNTERSUCHUNGSSTELLE BAHNEN UND SCHIFFE UUS, 2006: Schlussbericht über die Flankenfahrt der Züge 6836 (SBB P) und 39221 (BLS) vom Donnerstag, 20. Juli 2006 in Olten. UVEK. Bern.
- UNFALLUNTERSUCHUNGSSTELLE BAHNEN UND SCHIFFE UUS, 2007a: Schlussbericht über die Kollision von Zug 469 mit zwei Böschungsmähern vom Mittwoch, 16. August 2006 in Rheinfelden. UVEK. Bern.
- UNFALLUNTERSUCHUNGSSTELLE BAHNEN UND SCHIFFE UUS, 2007b: Schlussbericht über den schweren Vorfall vom Montag den 4. September 2006 im Grenchenbergtunnel. UVEK. Bern.
- UNFALLUNTERSUCHUNGSSTELLE BAHNEN UND SCHIFFE UUS, 2007c: Schlussbericht über die Zuggefährdung vom Donnerstag den 21. Dezember 2006 in Hünenberg-Chämleten. UVEK. Bern.
- UNFALLUNTERSUCHUNGSSTELLE BAHNEN UND SCHIFFE UUS, 2007d: Schlussbericht über die Kollision eines ICT (DB AG) mit einer Rangierbewegung von SBB Personenverkehr vom Sonntag, 11. Februar 2007 in Zürich Vorbahnhof. UVEK. Bern.
- UNFALLUNTERSUCHUNGSSTELLE BAHNEN UND SCHIFFE UUS, 2007e: Schlussbericht über die Zuggefährdung vom Montag 19. März 2007 in Sins. UVEK. Bern.

- UNFALLUNTERSUCHUNGSSTELLE BAHNEN UND SCHIFFE UUS, 2007f: Schlussbericht über die Zuggefährdung vom Mittwoch, 23. Mai 2007 in Forch. UVEK. Bern.
- UNFALLUNTERSUCHUNGSSTELLE BAHNEN UND SCHIFFE UUS, 2007g: Schlussbericht über die Zugskollision zwischen den Zügen 68097F und 66966F von BLS Cargo vom Samstag 4. August 2007 in Biel Rangierbahnhof. UVEK. Bern.
- UNFALLUNTERSUCHUNGSSTELLE BAHNEN UND SCHIFFE UUS, 2008: Schlussbericht über die Flankenfahrt zwischen den Zügen 90087 von SBB Cargo und der S-Bahn S 12 19271 von SBB Personenverkehr vom Freitag, 30. November 2007 in Winterthur PB. UVEK. Bern.
- UNFALLUNTERSUCHUNGSSTELLE BAHNEN UND SCHIFFE UUS, 2009a: Schlussbericht über die Zuggefährdung vom Dienstag, 2. September 2009 in Pardorea (Gotthard Südrampe). UVEK. Bern.
- UNFALLUNTERSUCHUNGSSTELLE BAHNEN UND SCHIFFE UUS, 2009b: Schlussbericht über die Zuggefährdung vom 28. Mai 2009 in Elgg. UVEK. Bern.
- UNFALLUNTERSUCHUNGSSTELLE BAHNEN UND SCHIFFE UUS, 2009c: Schlussbericht über den Personenunfall bei Zug 5823 (BLS) vom Donnerstag, 04. Juni 2009 in Wimmis (BE). UVEK. Bern.
- UNFALLUNTERSUCHUNGSSTELLE BAHNEN UND SCHIFFE UUS, 2009d: Schlussbericht über die Zuggefährdung vom 30. Juni 2009 in Basel RB. UVEK. Bern.
- UNFALLUNTERSUCHUNGSSTELLE BAHNEN UND SCHIFFE UUS, 2009e: Schlussbericht über die Zuggefährdung vom 04. September 2009 in Lenzburg. UVEK. Bern.
- UNFALLUNTERSUCHUNGSSTELLE BAHNEN UND SCHIFFE UUS, 2010a: Schlussbericht über die Zuggefährdung vom 01. September 2009 in Möhlin. UVEK. Bern.
- UNFALLUNTERSUCHUNGSSTELLE BAHNEN UND SCHIFFE UUS, 2010b: Schlussbericht über die Kollision des Zugs 442a der WAB mit einer Baumaschine vom Mittwoch 07. Oktober 2009 in Brandegg (Grindenwald). UVEK. Bern.
- UNFALLUNTERSUCHUNGSSTELLE BAHNEN UND SCHIFFE UUS, 2010c: Schlussbericht über die Zuggefährdung vom Mittwoch 18. November 2009 in Wildeg. UVEK. Bern.
- UNFALLUNTERSUCHUNGSSTELLE BAHNEN UND SCHIFFE UUS, 2010d: Schlussbericht über die Kollision zwischen den Güterzügen 43695 (BLS Cargo) und 40162 (Crossrail) vom Donnerstag 28. Januar 2010 in Brig. UVEK. Bern.
- UNFALLUNTERSUCHUNGSSTELLE BAHNEN UND SCHIFFE UUS, 2011a: Schlussbericht über Flankenfahrt vom Donnerstag, 24. Juni 2010 in Felsenburg. UVEK. Bern.
- UNFALLUNTERSUCHUNGSSTELLE BAHNEN UND SCHIFFE UUS, 2011b: Schlussbericht über Kollision eines S-Bahn-Zugs mit einer stehenden Rangierkomposition (Bau) der SBB vom Freitag, 06. August 2010 in Zürich HB, Gleis A17. UVEK. Bern.
- UNFALLUNTERSUCHUNGSSTELLE BAHNEN UND SCHIFFE UUS, 2011c: Schlussbericht über Zuggefährdung vom Mittwoch, 15. September 2010 (Luino, Italien) – Magadino, Schweiz. UVEK. Bern.
- UNFALLUNTERSUCHUNGSSTELLE BAHNEN UND SCHIFFE UUS, 2011d: Schlussbericht über den Beinaheunfall vom 27. Oktober 2010 in Othmarsingen. UVEK. Bern.
- UNFALLUNTERSUCHUNGSSTELLE BAHNEN UND SCHIFFE UUS, 2011e: Schlussbericht über die Kollision eines Personenzuges mit einer Rangierbewegung des Baudienst vom Freitag 4. Februar 2011 bei Wengen (Bannwald – Allmend, km 6.3). UVEK. Bern.

- UNFALLUNTERSUCHUNGSSTELLE BAHNEN UND SCHIFFE UUS, 2011f: Schlussbericht über Kollision von Zug 5026 der RhB im Klosters Tunnel vom Donnerstag 28. April 2011 in Klosters. UVEK. Bern.
- UNFALLUNTERSUCHUNGSSTELLE BAHNEN UND SCHIFFE UUS, 2011g: Schlussbericht über die Kollision zwischen Regionalzug 25495 (SBB P) und Lokzug 37038 (SBB C) vom Montag, 08. August 2011 in Döttingen AG. UVEK. Bern.
- VERRON Hedwig/HUCKESTEIN Burkhard/PENN-BRESSEL Getrude/RÖTHKE Petra/BÖLKE Michael/HÜLSMANN Wulff, 2005: Determinanten der Verkehrsentstehung. Umweltbundesamt. Dessau.
- VESTER Frederic, 1978: Phänomen Stress. Wo liegt sein Ursprung, warum ist er lebenswichtig, wodurch ist er entartet? Deutscher Taschenbuch Verlag GmbH & Co, KG, München.
- VESTER Frederic, 1983: Unsere Welt - ein vernetztes System. 10. Auflage. Deutscher Taschenbuch Verlag GmbH & Co, KG, München.
- VESTER Frederic, 1999: Crashtest Mobilität. Die Zukunft des Verkehrs. Fakten, Strategien, Lösungen. Deutscher Taschenbuch Verlag GmbH & Co, KG, München.
- VESTER Frederic, 2002: Die Kunst, vernetzt zu denken. Ideen und Werkzeuge für einen neuen Umgang mit Komplexität. 5. Auflage. Deutscher Taschenbuch Verlag GmbH & Co, KG, München.
- VIETOR Thomas, 2011: Grundlagen der Produktentwicklung und Konstruktion. Skript zur Vorlesung Wintersemester 2011/12. TU Braunschweig, Institut für Konstruktionstechnik. Braunschweig.
- VÖLCKER Marcus, 2012: Adaptive Lenkung bei den SBB. IT Rail. http://www.it13rail.ch/downloads/presentations/7_Voelcker_ADL_IT13rail.pdf, 31.01.2014
- WÄGLI Hans G, 2010a: Schienennetz Schweiz. Ein technisch-historischer Atlas. AS Verlag & Buchkonzept AG. Zürich.
- WÄGLI Hans G, 2010b: CH+. Bahnprofil Schweiz. Ein technischer Reisebegleiter mit Alpenbahnen und Linien im nahen Ausland. Distanzen, Gleisanlagen, Kunstbauten, Projekte. AS Verlag & Buchkonzept AG. Zürich.
- WEBER Max Maria von, 1867: Das Telegraphen- und Signalwesen der Eisenbahn. Geschichte und Technik desselben. S. 9–10. Voigt, Weimar.
- WEGELE Stefan, 2005: Echtzeitoptimierung für die Disposition im Schienenverkehr. Dissertation. Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik. TU Braunschweig.
- WEGELE Stefan, 2011: Bedienungsanleitung des Programms QRailScan. Braunschweig.
- WINTER Stefanie, 2000: Quantitative vs. qualitative Methoden. Lehrstuhl für Wirtschafts- und Organisationspsychologie. Universität Mannheim. http://imihome.imi.uni-karlsruhe.de/nquantitative_vs_qualitative_methoden_b.html, 02.02.2014.
- WISSEN Ulrike, 2009: Virtuelle Landschaften zur partizipativen Planung. Optimierung von 3D Landschaftsvisualisierungen zur Informationsvermittlung. IRL-Bericht 5. Publikationsreihe des Instituts für Raum- und Landschaftsentwicklung (IRL), ETHZ. Zürich.
- WOITSCHÜTZKE Claus P., 2002: Verkehrsgeographie. 2. aktualisierte Auflage. Bildungsverlag EINS. Troisdorf.
- YERKES Robert M./DODSON John D., 1908: The Relation of Strength of Stimulus to Rapidity of Habit-formation. Journal of Comparative Neurology and Psychology, 18, 459–482. Verfügbar unter <http://psychclassics.yorku.ca/Yerkes/Law/>, 13.03.2014

Internetquellen

https://files.ifi.uzh.ch/terg/arvo/ftp/inf_II/inf_II_kapitel_02.pdf, 09.11.2013
<http://railml.org>, 09.11.2013
<https://trac.assembla.com/railML/ticket/173>, 29.11.2013
<http://wiki.railml.org/index.php?title=IS:signal>, 29.11.2013
<http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/11.html>, 29.11.2013
<http://www.bls.ch/d/infrastruktur/kennzahlen.php>, 29.11.2013
<http://www.desm.ch>, 05.05.2014
<http://www.elementp.ch/de/>, 15.12.2013
http://www.geomatik.ch/fileadmin/redaktion/download/2004/Fach/FA_12_2004_3.pdf,
 29.11.2013
<http://www.gpsinfradat.de>, 29.01.2013
<http://www.iglos.de/doc/>, 27.12.2013
http://www.interlis.ch/general/faq_d.php#faq_q04_002, 14.01.2014
<https://www.iglos.de/doc/>, 03.02.2014
http://www.iqst.de/?page_id=24, 25.11.2013
<http://www.mathworks.ch/products/matlab/>, 03.02.2014
<http://www.railml.org>, 07.01.2014
<http://www.sbb.ch/sbb-konzern/ueber-die-sbb/zahlen-und-fakten/infrastrukturen.html>,
 29.11.2013
<http://www.sob.ch/unternehmen/ueber-uns/in-zahlen.html>, 29.11.2013
<http://www.uic.org/spip.php?article529>, 07.11.2013
<http://www.voev.ch/UIC.html>, 07.11.2013
<http://www.zusi.de/pages/dehaupt/zusi-3/anwendungsbereiche/systemsimulation.php>, 06.12.2013

andere Quellen

BUNDESAMT FÜR VERKEHR: Daten aus der Nationalen Ereignisdatenbank für die Signalfälle auf dem Schweizerischen Eisenbahnnetz der Jahre 2010 bis 2012. Bern.

VEREIN DESM, 2014: Dynamisches Eisenbahn System Modell. Businessplan 2014 - 2016. Goldwil.

ELEMENT P, 2012: Video mit Versuch für das Retouche eines Signals. Biel/Bienne.

Auskunftspersonen

Name	Funktion und Organisation	Stellungnahme	Datum
ASBACH Lennart	Institut für Verkehrssystemtechnik Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR	schriftlich	12.02.2014
CHEVALIER Francis	ehemaliger Bahnhofsvorstand von Murten und Ausbildungsleiter Fahrdienst SBB	mündlich	13.01.2014
DÄLLENBACH Fredi	Bundesamt für Verkehr, Sektion Sicherheitsrisiko- Management	schriftlich	02.06.2014
HAUSAMMANN Peter	Stabsadj im Mechanisierten Ausbildungszentrum der Armee MAZ	mündlich	24.01.2014
HÖLSCHER Carsten	Dipl.-Ing. Entwickler und Geschäftsleiter der Firma ZUSI Bahnsimulatoren, Braunschweig.	mündlich	12.12.2013
HOSSE René	Dipl. Wirtsch.-Ing., Institut für Verkehrssicherheit und Automatisie- rungstechnik der TU Braunschweig.	mündlich	28.04.2014
HÜRLIMANN Daniel	Dr.-Ing. Entwickler und Geschäftsleiter der Firma OpenTrack Railway Technology GmbH	mündlich	28.01.2014
QUIROGA Lisandro	Dr.Ing. Verantwortlicher für das Simulationsin- strument II-Tool, Firma iQST.	schriftlich	08.01.2014
RAHMIG Christian	Dipl.-Ing. Koordinator bei Initiative railML. Deutsches Institut für Luft- und Raumfahrt.	schriftlich mündlich	10.12.2013 11.12.2013
RIESEN Fabian	Dipl.-Ing. Firma CISCO Entwickler Dispatcher	mündlich	16.01.2013
ROHRER Hansjürg	Dr.-Ing. Professor an der Berner Fachhochschule Biel	schriftlich	28.01.2014
STRAUBE Sebastian	Informatiker Projektleiter DESM-Forschungslabor	schriftlich mündlich	03.02.2014
VON AESCH Mike	Lokführer BLS und Vorstandsmitglied Verein DESM	mündlich	09.01.2014
VON BUXHOEVEDEN Geltmar	Dipl. Wirtsch.-Ing., Institut für Verkehrssicherheit und Automatisie- rungstechnik der TU Braunschweig.	mündlich	14.05.2014
VOGEL Stefan	Editor der Filmagentur ELEMENT P Versuchsvideo für Signalretouche	schriftlich	10.02.2014
WÄGLI Hans	ehemaliger Informationschef der Schweizerischen Bundesbahnen SBB und Autor Schienennetz Schweiz	schriftlich mündlich	04.12.2012 13.01.2014
WELTE Jan	Dipl. Wirtsch.-Ing., Institut für Verkehrssicherheit und Automatisie- rungstechnik der TU Braunschweig.	mündlich mündlich	28.04.2014 21.05.2014
WEGELE Stefan	Dr.-Ing. Entwickler von II-Tool und der videoba- sierten Datenerhebung QRailScan. SIEMENS	mündlich	10.12.2013
WÜTHRICH Markus	Stabsadj im Mechanisierten Ausbildungszentrum der Armee MAZ	mündlich	24.01.2014

Beziehungen zwischen Vorgängen und Zuständen

Entwurf und Ausführung:
SUTER 2012





n|w Fachhochschule
Nordwestschweiz

Vorname, Name:	Hans Muster
Datum:	12.03.2013
Startzeit:	16:00
Lord-Nr. FASI	130312.16



Dynamisches Eisenbahn System Modell
Modèle dynamique d'un système ferroviaire
Dynamic model of a railway system

Jürg Suter
j.suter@desm.ch

Stettlen, 13.03.2013, Version 2.3

A^{1, 2}

Versuchsfahrten mit Lokführer

Drehbuch für Übung

DESM-01-OL-BGG

1. Ausgangslage

Orientierung an Lokführer	<input type="checkbox"/> Es ist folgender Reiseextrazug zu führen: – 33835 von Olten nach Brugg (A1: mit Zeitdruck, A2 ohne Zeitdruck) <input type="checkbox"/> Komposition: Re 460 im Originalzustand (ZFK88) mit 6 EW IV (je V_{\max} 160 km/h) <input type="checkbox"/> Übernahme des Zuges. Annahme: Wie Pendelzug bei Führerstandwechsel <input type="checkbox"/> Türen: Wie Pendelzug mit seitenselektiver Türsteuerung <input type="checkbox"/> Funk: Kanäle S28, Z64 einstellen, Kommunikation über Gegensprecher
Dokumente an Lokführer	<input type="checkbox"/> Fahrordnungen von Zug und 33835, Meldung an den Lokführer für Zug und 33835 <input type="checkbox"/> Informationsblatt mit Hinweisen <input type="checkbox"/> Sammelformular Befehl 6 für Zug 33835 nicht abgeben! (wird in Rapperswil diktiert)

2. Ablauf der Übung

Ort	Ü-Zeit	Nr.	Instruktor	Beobachtung/Messung	Ergebnis
Olten			<input type="checkbox"/> Ausfahrtsignal M5: Fahrbeogr. 2	Inbetriebnahme Zug	
Olten	18:03	D1	<input type="checkbox"/> Abfahrerlaubnis erteilen (A1 ohne Zeitsynchronisierung, A2 mit Zeitsynchronisierung)	<input type="checkbox"/> Bremsprobe auf Wirkung	..... J / N
Dulliken	18:(05)				
Däniken	18:(07)	D2	Ausfahrtsignal geschlossen <input type="checkbox"/> Nach Vorbeifahrt Zwergsignal XF2 (schräg) Ausfahrtsignal auf Fahrt 1 stellen	<input type="checkbox"/> Reaktion angemessen (Bremsung, Sicht auf Signal abwarten)	..... J / N
Schönenwerd	18:(09)	D3	V-Ankündigung 90	<input type="checkbox"/> Reaktion angemessen (Bremsung)	..... J / N
Aarau	18:12/14	D4	<input type="checkbox"/> im Stadtunnel Wetter umstellen: 70% Regen, 25% Adhäsion Keine Abfahrerlaubnis	Prozess unbegleitete Abfahrt <input type="checkbox"/> schliesst Türen	..... J / N
Rapperswil	18:(17)	D5 D6 D7 D8	Einfahrtsignal geschlossen *) <input type="checkbox"/> Sammelform. Bf 6 diktieren <input type="checkbox"/> nach Protokoll 1 Minute warten, dann Hilfssignal einschalten	<input type="checkbox"/> Meldung an Fahrdienst (max. 3 Min) <input type="checkbox"/> Protokoll Sammelformular <input type="checkbox"/> wartet Hilfssignal ab <input type="checkbox"/> Fährt auf Sicht, V_{\max} 40 km/h	..... [Sek.] J / T / N J / T / N J / T / N
Wildeggen	18:21	D9 D10	Ausfahrtsignal F3	<input type="checkbox"/> beachtet Lf den Halt? <input type="checkbox"/> schliesst Türen Wechsel auf falsches Gleis (Fahrt ohne Aufforderung)	..... J / N J / N
Schinznach Bad	18:25	D11 D12		<input type="checkbox"/> beachtet Lf den Halt? <input type="checkbox"/> schliesst Türen	..... J / N J / N
Brugg	18:30	D13 D14	Einfahrvorsignal dunkel	Reaktion, Einleiten der Bremsung <input type="checkbox"/> Bremsung <input type="checkbox"/> Verständigung Fahrdienst: Vorsignal	..... J / N J / N
			Ankunftszeit		18: [Zeit]

*) nach Durchfahrt Güterzug: Einfahrtsignal auf Halt stellen

Schweizerische Eisenbahnen Chemins de fer suisses Ferrovie svizzere		Meldung an den Lokführer Avis au mécanicien de locomotive Avviso al macchinista	
Datum Date Data	..... 2013	Zug Train Treno	33835
begleitet/accompagné/scortato? <input type="checkbox"/> ja / oui / sì <input checked="" type="checkbox"/> nein / non / no			
von de da	Olten		
nach à a	Brugg		
Zug- und Bremsreihe Catégorie de train et de freinage Categoria di treno e di freno	R 135	%	%
V. max.	160	km/h	km/h
Länge Longueur Lunghezza	158 m	24 A	m A
Gewicht Poids Peso	300	t	t
Bremsgewicht Poids-frein Peso-freno	504	t	t
Lok (Serie) Loc (serie) Loc (serie)	<input type="checkbox"/> Z <input type="checkbox"/> P <input type="checkbox"/> Q		
Anzahl Wagen/Gewicht Nombre wagons/poids Numero dei carri/peso	1. Teil 1 ^{re} partie		
Umstellvorrichtungen Dispositifs d'inversion Dispositivi di inversione	Stellung G Position M Posizione M	<input type="checkbox"/> teilw./en partie/pariaale <input type="checkbox"/> ganz/compil/totalie	<input type="checkbox"/> teilw./en partie/pariaale <input type="checkbox"/> ganz/compil/totalie
Notiz, der Beauftragte (Name + Datum): Noté, le commandant (Nom + date): Notificato, il committente (Nome + data):			
BZ, 2013			
<input checked="" type="checkbox"/> Zutreffendes ankreuzen / Marquer d'une croix ce qui convient / Crociare ciò che necessita			

Schweizerische Eisenbahnen Chemins de fer suisses Ferrovie svizzere		Fahrordnung für Züge Marche pour trains Orario di marcia per treni	
Datum Date Data	..... 2013	verkehrt Zug circule le train circola treno	33835
begleitet? Train accompagné? Treno scortato? <input type="checkbox"/> ja / oui / sì <input checked="" type="checkbox"/> nein / non / no			
von de da	Olten	nach à a	Brugg
Reihe Cat. Cat.		R 135 %	
Anhängelast: Charge remorquée: Peso rimorchiato:	V. max. 160 km/h	Länge Longueur Lunghezza	24 A 158 m
Gewicht Poids Peso	300 t	Bremsgewicht Poids frein Peso freno	504 t
Bahnhof Gare Stazione	Verkehrszeit Heure de circulation Ore di circolazione	XVII	Bemerkungen Observations Osservazioni
Olten	18.03		
Dulliken	(05)		
Däniken	(07)		
Schönenwerd	(09)		
Aarau	18.12/14		
Rupperswil	(17)		
Wildeg	21		
Schinz nach Bad	25		
Brugg	18.30		
<input checked="" type="checkbox"/> Zutreffendes ankreuzen / Marquer d'une croix ce qui convient / Crociare ciò che necessita			
Bahnhof Gare Stazione	BZ	Datum Date Data	..... 2013
		Lokführer	

ZFK 88: Einstellen der Funkkanäle für alle Übungen:

S 28, Z 64**nicht abgeben!**

Datum Date Data	..... 2013	Zug/Rangierbewegung auf die Strecke Train/Mouvement de manœuvre en pleine voie Treno/movimento di manovra sulla tratta	33835
6 <input checked="" type="checkbox"/>	Verminderung der Geschwindigkeit Réduction de la vitesse Riduzione della velocità		
im Bahnhof à la gare nella stazione	<input type="checkbox"/> Fahrt auf Sicht Marche à vue Corsa a vista V. max. km/h		
zwischen entre fra	Rupperswil und et e	Wildeg	<input checked="" type="checkbox"/> Fahrt auf Sicht Marche à vue Corsa a vista V. max. km/h
von du km dal	bis au km al		<input type="checkbox"/> V. max. km/h
zwischen entre fra	und et e		<input type="checkbox"/> Fahrt auf Sicht Marche à vue Corsa a vista V. max. km/h
von du km dal	bis au km al		<input type="checkbox"/> V. max. km/h
Weiche l'aiguille scambio	km		<input type="checkbox"/> V. max. km/h
Langsamfahrsignale aufgestellt; Signaux de ralentissement posés; Segnali di rallentamento posati:	<input type="checkbox"/> ja oui sì	<input type="checkbox"/> nein non no	
7 <input type="checkbox"/>	Mit gesenkten Stromabnehmern fahren Circuler avec pantographes abaissés Circolare con pantografi abbassati		
bei der Einfahrt in den Bahnhof à l'entrée de la gare de all'entrata nella stazione di			
bei der Ausfahrt aus dem Bahnhof à la sortie de la gare de all'uscita dalla stazione di			
bei der Durchfahrt im Bahnhof au passage de la gare de al passaggio nella stazione di			
auf der Strecke von sur la pleine voie de sulla tratta dal	km	bis au km al	
zwischen den Bahnhöfen entre les gares de tra le stazioni di		und et e	
Grund / Bemerkungen Motif / observations Motivo / osservazioni			
Isolierstörung			
<input checked="" type="checkbox"/> Zutreffendes ankreuzen / Marquer d'une croix ce qui convient / Crociare ciò che necessita			
Bahnhof Gare Stazione	BZ	Datum / Zeit Date / Heure Data / Ora	..... 2013

Beispiel für Übermittlung Befehl 6:

Aufruf von Lokführer Lf an Fahrdienstleiter Fdl

Lf:	„Fahrdienst von Lokführer 33835 antworten“
Fdl:	„Fahrdienst verstanden, antworten“
Lf:	„verstanden, (Meldung)“
Fdl:	„verstanden, (Antwort auf Meldung), ich habe einen Befehl für Fahrt auf Sicht, antworten“
Lf:	(macht sich bereit) „verstanden, ich bin bereit, antworten“
Fdl:	„verstanden, am (Datum), Zug 33835 zwischen Rupperswil und Wildeg Fahrt auf Sicht. Grund: Isolierstörung. Unterschrift Fdl (Name), antworten“
Lf:	„verstanden, am (Datum), Zug 33835 zwischen Rupperswil und Wildeg Fahrt auf Sicht. Grund: Isolierstörung. Unterschrift Fdl (Name), Bestätigung Lf (Name), antworten“
Fdl:	„richtig, schluss“

Aufruf von Fahrdienstleiter Fdl an Lokführer Lf

Fdl:	„Lokführer 33835 von Fahrdienst Olten antworten“
Lf:	„33835 verstanden, antworten“
Fdl:	„verstanden, ich habe einen Befehl für Fahrt auf Sicht, antworten“
Lf:	(macht sich bereit) „verstanden, ich bin bereit, antworten“
Fdl:	„verstanden, am (Datum), Zug 33835 zwischen Rupperswil und Wildeg Fahrt auf Sicht. Grund: Isolierstörung. Unterschrift Fdl (Name), antworten“
Lf:	„verstanden, am (Datum), Zug 33835 zwischen Rupperswil und Wildeg Fahrt auf Sicht. Grund: Isolierstörung. Unterschrift Fdl (Name), Bestätigung Lf (Name), antworten“
Fdl:	„richtig, schluss“



n|w Fachhochschule
Nordwestschweiz



Dynamisches Eisenbahn System Modell
Modèle dynamique d'un système ferroviaire
Dynamic model of a railway system

Jürg Suter
j.suter@desm.ch

Stettlen, 13.03.2013, Version 2.3

B^{1, 2}

Versuchsfahrten mit Lokführer

Drehbuch für Übung

DESM-02-BAD-ZUE

1. Ausgangslage

Orientierung an Lokführer	<input type="checkbox"/> Es sind zwei folgenden Reiseextrazüge zu führen: – 33837 von Baden nach Zürich HB (B1: mit Zeitdruck, B2 ohne Zeitdruck) <input type="checkbox"/> Komposition: Re 460 im Originalzustand (ZFK88) mit 6 EW IV (je V_{\max} 160 km/h) <input type="checkbox"/> Übernahme des Zuges. Annahme: Wie Pendelzug bei Führerstandwechsel <input type="checkbox"/> Türen: Wie Pendelzug mit seitenselektiver Türsteuerung <input type="checkbox"/> Funk: Kanäle S28, Z64 einstellen, Kommunikation über Gegensprecher
Dokumente an Lokführer	<input type="checkbox"/> Fahrordnungen von Zug und 33835, Meldung an den Lokführer für Zug und 33835 <input type="checkbox"/> Informationsblatt mit Hinweisen <input type="checkbox"/> Sammelformular Befehl 6 für Zug 33837 (Langsamfahrstelle)

2. Ablauf der Übung

Ort	Ü-Zeit	Nr.	Instruktor	Beobachtung/Messung	Ergebnis
Baden		D1 D2	Zwergsignal steht auf Fahrt <input type="checkbox"/> während Vorbereitung Zwergsignal auf freie Fahrt stellen Zwergsignal nur obere Lampe	Inbetriebnahme Zug <input type="checkbox"/> Funkkanäle S28, Z64 (ev. helfen) <input type="checkbox"/> Bremsprobe auf Wirkung <input type="checkbox"/> Reaktion: Verständigung Fahrdienst	..... J / N J / N
Baden	19:05	D3	<input type="checkbox"/> Ausfahrsignal auf Fahrt 1 stellen; B1 ohne Zeitsynchronisierung, B2 mit Zeitsynchronisierung (Klick auf Bahnhof-Symbol)	<input type="checkbox"/> schliesst Türen	..... J / N
Wettingen	19:(07)				
Neuenhof	19:(09)	D4 D5 D6	Traktionsausfall Langsamfahrstelle 80 km/h Schutzstrecke	<input type="checkbox"/> Bremsung einleiten vor Vorsignal 80 <input type="checkbox"/> V_{IST} 80 km/h bei Anfangssignal <input type="checkbox"/> Ablauf Schutzstrecke	..... J / N J / N J / N
Killwangen-Spreitenbach	19:(12)				
Dietikon	19:(14)	D7	Ausfahrsignal geschlossen (anderes Signal in Staffel zeigt Fahrt) <input type="checkbox"/> Ausfahrt auf Fahrt stellen, wenn beide Ausfahrsignale gut sichtbar (ca. Mitte Perron)	<input type="checkbox"/> Reaktion angemessen; Handlung nach Erkennen Signal Fahrt im Nachbargleis	..... J / T / N
Schlieren	19:(17)				
Zürich Altstetten	19:20	D8 D9 D10		V Ankündigung 60 km/h <input type="checkbox"/> V Ausführung 60 km/h <input type="checkbox"/> Beachtet Lf den Halt in Z Altstetten? <input type="checkbox"/> schliesst Türen	..... [km/h] J / N J / N
Hardbrücke		D11 D12	<input type="checkbox"/> Notruf absetzen und nicht oder unklar kommentieren (Ende Perron Hardbrücke)	Verhalten Lf <input type="checkbox"/> Zeit nach Notruf (Sek) <input type="checkbox"/> Fahrt auf Sicht, V_{\max} 40 km/h <input type="checkbox"/> Verständigung Fahrdienst	..... [Sek.] J / N J / N
Zürich HB	19:24	D13 D14	Zwergsignal nur untere Lampe	Verhalten Lf <input type="checkbox"/> Hält an <input type="checkbox"/> Verständigung Fahrdienst Ankunft in Zürich HB	..... J / N J / N 19:

☐ Zutreffendes ankreuzen / Marquer d'une croix ce qui convient / Crociare ciò che necessita

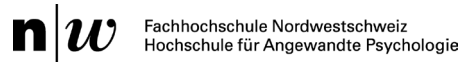
 Zutreffendes ankreuzen / Marquer d'une croix ce qui convient / Crociare ciò che necessita

S 28, Z 64

Strecken	Betriebspunkt 1	Betriebspunkt 2	Vmax	Gleis	km von	km nach	Gültig ab	Gültig bis	Bemerkung
111 111 (B)	Lausanne	Lausanne (bif)	50	A61 – A71	0.1	0.35	25.01.2012	31.12.2020	
111-2 111-2B	Genève	Chambésy	80	242	58.61	59.15	11.10.2012	31.12.9999	Protection Pose uniquement entre 20h30 et 05h30
111-2 111-2B	Jonction (Genève)	Genève La Praille	40	32 & 44	63.7	63.96	26.11.2012	31.12.2014	
121 121 (B)	Fribourg/Freiburg	Düdingen	100	845 / 945	67.3	67.71	14.05.2012	28.06.2013	
121 121 (B)	Fribourg/Freiburg	St-Léonard	50	A64	66.07	66.2	22.06.2012	17.01.2014	Nr. : Lsgi + 45 Sortie depuis la voie 4 sur voie A64
121 2 (B) 121-2	Rosé	Villars-sur-Glâne	80	43-936	58.06	60.48	04.02.2013	06.04.2013	Nr. : LSRD+-11
121 2 (B) 121-2	Villars-sur-Glâne	Rosé	50	936	60.48	60.28	11.02.2013	10.04.2013	Nr. : LSRD+-12 Seulement Samedi 22h00 – Lundi 07h30
121 2 (B) 121-2	Villars-sur-Glâne	Rosé	80	936	60.48	60.28	11.02.2013	10.04.2013	Nr. : LSRD+-13
141-2 141-2 (B)	Burgdorf	Wynigen	80	383 & 483	82.73	82.66	08.02.2013	12.04.2013	Nr. : FOL +/- 03/13 & FOL +/- 04/13
141-2 141-2 (B)	Lerchenbühl (Verzw.)	Wynigen	50	3	83.67	83.31	07.03.2013	14.04.2013	Nr. : 153+-11
161 161 (B)	Wettingen	Killwangen-Spreitenbach	80	711-714	17.57	17.23	12.03.2013	06.04.2013	
171 171 (B)	Regensdorf-Watt	Z Seebach	50	958-957	16.87	17.22	10.03.2012	12.04.2013	Nr. : +/- HF19
201 201 (B)	Brettonnières	Le Day	80	119 & 219	38.2	38.5	11.12.2012	31.01.2020	Nr. : LSHa+-11 & LSHa +-12
211 211 (B)	Châteauneuf- Conthey	Chamoson	80	2	84.9	85.8	12.04.2012	03.05.2013	
211 211 (B)	Martigny	Vernayaz	100	137-138 & 238-237	62.4	62.0	14.12.2012	28.04.2013	Nr. : smsi7012 & smsi7112
211-2 211-2B	Lutry	Pully	80	102	4.41	4.96	21.12.2012	29.04.2013	Nr. : 49YS2012+/-
211-2 211-2B	Pully	Lutry	80	202	3.96	4.5	21.01.2013	30.04.2013	Nr. : 01YS2013+/-
221 221(B)	Salgesch	Sierre/Siders	50	279	109.66	109.3	25.02.2013	16.03.2013	Nr. : CSSI 02 Stabilité de la voie
222 222 (B)	Varzo	Iselle di Trasquera	50	207-208	13.5	18.5	11.03.2013	27.04.2013	Nr. : +/- 15/13 & +/- 18/13 Posizionato solo temporaneamente

207.1/302	Olten - Brugg - Zürich	2) V max. Klw - RBL bei Fahrt über Gl. 310	60 km/h	FASt
-----------	------------------------	--	---------	------

FAS1	V max.	Kl.w.	RBL bei Fahrt über Gl	310	65 km/h
207.1/302	Oltten - Brugg	- Zürich	Oltten - Brugg	- Zürich	207.1/302
207.1/302	Oltten - Brugg	- Zürich	2) V max.	Kl.w.	RBL bei Fahrt über Gl
310	60 km/h				FAS1



Dynamisches Eisenbahn System Modell
Modèle dynamique d'un système ferroviaire
Dynamic model of a railway system

E1

Jürg Suter
<http://www.desm.ch>
j.suter@desm.ch

Stettlen, 11.03.2013, Version 1.1

Einwilligung für Datenerhebungen

Vorname		Name	
E-mail		Lord-Nr. FASI	

Ich stimme zu, an den Versuchsfahrten und den qualitativen Datenerhebungen (Interviews und Fragebogen) im Rahmen nachstehender Forschungsarbeiten teilzunehmen:

SUTER Jürg, Aufbau und Visualisierung eines dynamischen Eisenbahn-Systemmodells in Raum und Zeit, Technische Universität Braunschweig;

STOLLER Nicole, Situation Awareness von Lokführenden während sicherheitskritischer Ereignisse im Bahnverkehr, Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW;

SCHWAGER Mirjam, Folgen der Automatisierung von Lokführer und Zugverkehrsleiter auf ihre Zusammenarbeit – Analyse und Vorschläge für eine verbesserte Kommunikation, Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW;

SUTER Cédric, Sicherheits-Meldesysteme von Seiten des Bundesamts für Verkehr und der Schweizerischen Bundesbahnen, Beitrag zur Sicherheit im Schweizerischen Schienenverkehr.

- Alle erhobenen und aufgezeichneten Daten werden ausschliesslich für die Erstellung der Bachelorarbeit genutzt. Sie werden vertraulich und im Sinne des Datenschutzes behandelt;
- Interviews werden auf einem Tonträger aufgezeichnet. Alle persönlichen Daten werden in Abschriften der Aufnahme gelöscht. Für Publikationen beziehungsweise die interne Verwendung (Forschungsarbeiten) werden nur vollständig anonymisierte Daten verarbeitet und genutzt. Alle persönlichen Daten (Aufnahmen) werden am Ende der Bachelorarbeit werden gelöscht;
- Vor Abschluss der Forschungsarbeiten kann der Teilnehmer kann seine Einwilligung rückgängig machen. In einem solchen Fall werden die erhobenen und aufgezeichneten Daten gelöscht;
- Der Teilnehmer stimmt zu, dass für die Forschungsarbeiten nur vollständig anonymisierte Daten genutzt werden;
- Der Teilnehmer kann die Datenerhebungen und seine Beteiligung an Interviews jederzeit und ohne Grundangabe beenden. Es entstehen daraus keine Nachteile;
- Der Teilnehmer wurde über den Inhalt der laufenden Projekte informiert und hat eine Kopie dieser informierten Einwilligung erhalten.

Der Teilnehmer:

Für die Forschungsarbeit:

.....

.....

Jürg Suter



E2

Jürg Suter

<http://www.desm.ch>

j.suter@desm.ch

Stettlen, 11.03.2013, Version 1.1

Fragebogen Demografische Daten für Probanden

Vorname		Name	
E-mail		Lord-Nr. FASI	

Geschlecht:	<input type="checkbox"/> m	<input type="checkbox"/> w	Jahrgang:	
Muttersprache	<input type="checkbox"/> deutsch	<input type="checkbox"/> französisch	<input type="checkbox"/> andere:	

Wie viele Jahre Arbeitserfahrung als Lokführer haben Sie?		
Regionalverkehr, S-Bahn	..... Jahre	¹ davon Jahre Teilzeit (..... %)
Fernverkehr (Personenverkehr)	..... Jahre	¹ davon Jahre Teilzeit (..... %)
Güterverkehr	..... Jahre	¹ davon Jahre Teilzeit (..... %)
Rangierdienst, Bau	..... Jahre	¹ davon Jahre Teilzeit (..... %)
Gesamte Berufserfahrung als Lokführer ²	..... Jahre	

¹ falls zutreffend

² Da sich die Berufsjahre in den einzelnen Verkehrsarten überschneiden können, wird auch die gesamte Anzahl Jahre Berufserfahrung gefragt

Falls Sie in den letzten 3 Jahren an einem Kurs oder Training im Sicherheitsbereich teilgenommen haben: Worum ging es dabei? (mehrere Kreuze möglich)	
<input type="checkbox"/>	Situationsbewusstsein / Situation Awareness
<input type="checkbox"/>	Treffen von richtigen Entscheidungen, Entscheidungsfindung
<input type="checkbox"/>	Umgang mit Stress, Stress-Management
<input type="checkbox"/>	Fachtechnische Information/Ausbildung
<input type="checkbox"/>	anderes, nämlich:

Q4.1

Fragebogen Ergonomie und Betrieb

Vorname		Name	
E-mail		Lord-Nr. FASI	

Wie bewerten Sie persönlich die Führerstände folgender Triebfahrzeuge bezüglich Ergonomie (Bedienungsfreundlichkeit) und Wohlbefinden während der Arbeit?

Re 460, Re 465	mangelhaft <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> sehr gut	<input type="checkbox"/> nicht bekannt
Re 4/4, Re 420, Re 6/6, Re 620, RBe 540, RBD 566 I (BLS)	mangelhaft <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> sehr gut	<input type="checkbox"/> nicht bekannt
RBD 560 (Domino)	mangelhaft <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> sehr gut	<input type="checkbox"/> nicht bekannt
RBD 565, 566 II (BLS)	mangelhaft <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> sehr gut	<input type="checkbox"/> nicht bekannt
Re 425 (BLS)	mangelhaft <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> sehr gut	<input type="checkbox"/> nicht bekannt
Re 482, Re 485, Re 486	mangelhaft <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> sehr gut	<input type="checkbox"/> nicht bekannt
ICE	mangelhaft <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> sehr gut	<input type="checkbox"/> nicht bekannt

Wie beurteilen Sie folgende Formen der betrieblichen Lenkung, indem der Lokführer zusätzliche Informationen/Empfehlungen erhält?

empfohlene Geschwindigkeit ohne Grundangabe (vgl. Adaptive Lenkung AdL)	störend <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> nützlich	<input type="checkbox"/> weiss nicht
Empfohlene Verkehrszeiten ohne Grundangabe (z.B. auf dem LEA oder el. Fahrplan)	störend <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> nützlich	<input type="checkbox"/> weiss nicht
Angabe bevorstehender Konflikte mit Zugreihenfolge, Kommunikation über GSM-R	störend <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> nützlich	<input type="checkbox"/> weiss nicht
Andere bevorzugte Form der Informationsübermittlung für die betriebliche Lenkung bei Konflikten:		

Wie sind Ihre persönlichen Erfahrungen/Meinungen mit der Adaptiven Lenkung (AdL) oder anderen Formen der betrieblichen Lenkung?

hinsichtlich dem Verhindern von Signalhalten	störend <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> nützlich	<input type="checkbox"/> weiss nicht
hinsichtlich energieeffizienter Fahrweise	störend <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> nützlich	<input type="checkbox"/> weiss nicht
hinsichtlich Verbesserung von Anschlussverbindungen	störend <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> nützlich	<input type="checkbox"/> weiss nicht
hinsichtlich Belastung des Lokführers	störend <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> nützlich	<input type="checkbox"/> weiss nicht
hinsichtlich Verständlichkeit und Anwendbarkeit	störend <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> nützlich	<input type="checkbox"/> weiss nicht

Wie Beurteilen Sie die möglichen Auswirkungen einer mangelhaften Personalzufriedenheit auf die Arbeit des Lokführers?

hinsichtlich Konzentration	tief <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> hoch	<input type="checkbox"/> weiss nicht
Hinsichtlich Aufmerksamkeit	tief <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> hoch	<input type="checkbox"/> weiss nicht
Hinsichtlich Fehlentscheidungen	tief <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> hoch	<input type="checkbox"/> weiss nicht
Hinsichtlich Fehlhandlungen (z.B. Signalfälle)	tief <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> hoch	<input type="checkbox"/> weiss nicht

Wie Beurteilen Sie die Personalzufriedenheit in Ihrem Umfeld?

	tief <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> hoch	<input type="checkbox"/> weiss nicht
--	--	--------------------------------------

Wie beurteilen Sie die in Ihrem Arbeitsbereich auf Grund der heutigen Situation tatsächlich vorhandenen Gefahren hinsichtlich folgender Themen?

Gruppensignale	nicht gefährlich <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> sehr gefährlich	<input type="checkbox"/> weiss nicht
ZUB-Ausrüstung	nicht gefährlich <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> sehr gefährlich	<input type="checkbox"/> weiss nicht
Verwechslung von Signalen in Staffel	nicht gefährlich <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> sehr gefährlich	<input type="checkbox"/> weiss nicht
Arbeitsbelastung	nicht gefährlich <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> sehr gefährlich	<input type="checkbox"/> weiss nicht
Missverständnisse bei Übermittlung	nicht gefährlich <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> sehr gefährlich	<input type="checkbox"/> weiss nicht



Wahrnehmung von Signalen durch ihre Vielfalt	nicht gefährlich <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> sehr gefährlich	<input type="checkbox"/> weiss nicht
Regelwerk zu kompliziert	nicht gefährlich <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> sehr gefährlich	<input type="checkbox"/> weiss nicht
Mangelhafte Personalführung	nicht gefährlich <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> sehr gefährlich	<input type="checkbox"/> weiss nicht
Unterhalt von Fahrzeugen	nicht gefährlich <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> sehr gefährlich	<input type="checkbox"/> weiss nicht
andere Themen:		



Fachhochschule Nordwestschweiz
Hochschule für Angewandte Psychologie



Dynamisches Eisenbahn System Modell
Modèle dynamique d'un système ferroviaire
Dynamic model of a railway system

Jürg Suter

<http://www.desm.ch>

j.suter@desm.ch

Stettlen, 11.03.2013, Version 1.1

Q4.2

Anwendung von Simulatoren

Vorname		Name	
E-mail		Lord-Nr. FASI	

Wie bewerten Sie den Fahrsimulator der Re 460?		
Gesamteindruck	mangelhaft <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> sehr gut	<input type="checkbox"/> weiss nicht
Visualisierung der Strecke (Sicht aus dem Führerstand)	mangelhaft <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> sehr gut	<input type="checkbox"/> weiss nicht
Abbildung der Infrastruktur	mangelhaft <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> sehr gut	<input type="checkbox"/> weiss nicht
Fahrdynamik (Bewegungssystem)	mangelhaft <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> sehr gut	<input type="checkbox"/> weiss nicht
Fahrgefühl	mangelhaft <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> sehr gut	<input type="checkbox"/> weiss nicht
Detaillierung des Führerstandes (Originalzustand)	mangelhaft <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> sehr gut	<input type="checkbox"/> weiss nicht
Simulation der Funktionen im Führerstand	mangelhaft <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> sehr gut	<input type="checkbox"/> weiss nicht

Wie bewerten Sie den Fahrsimulator der Re 4/4?		
Gesamteindruck	mangelhaft <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> sehr gut	<input type="checkbox"/> weiss nicht
Visualisierung der Strecke (Sicht aus dem Führerstand)	mangelhaft <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> sehr gut	<input type="checkbox"/> weiss nicht
Abbildung der Infrastruktur	mangelhaft <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> sehr gut	<input type="checkbox"/> weiss nicht
Fahrgefühl	mangelhaft <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> sehr gut	<input type="checkbox"/> weiss nicht
Detaillierung des Führerstandes (Originalzustand)	mangelhaft <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> sehr gut	<input type="checkbox"/> weiss nicht
Simulation der Funktionen im Führerstand	mangelhaft <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> sehr gut	<input type="checkbox"/> weiss nicht

Wie beurteilen Sie folgende Aussagen hinsichtlich der Simulatoren für die Ausbildung und die Untersuchung von komplexen Problemstellungen?

Das Bewegungssystem ist überflüssig – darauf kann verzichtet werden.

stimmt nicht ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ stimmt

☐ weiss nicht

Ein möglichst hoher Detaillierungsgrad ist unerlässlich, damit der Simulator ernst genommen wird.

stimmt nicht ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ stimmt

☐ weiss nicht

Es ist wichtig, dass sich der Lokführer in einer abgeschlossenen Kabine befindet und sich bei seiner Arbeit fühlt.

stimmt nicht ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ stimmt

☐ weiss nicht

Eine abgeschlossene, detailliert ausgerüstete Kabine ist überflüssig. Ein vereinfachter Führerstand genügt für alle Anwendungen.

stimmt nicht ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ stimmt

☐ weiss nicht

Das Training auf echten Strecken mit genau nachgebildeter Infrastruktur ist notwendig.

stimmt nicht ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ stimmt

☐ weiss nicht

Das Training auf echten Strecken mit genau nachgebildeter Infrastruktur ist gefährlich (lernen von falschen Reaktionen).

stimmt nicht ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ stimmt

☐ weiss nicht

Die möglichst realistische Darstellung der Landschaft und der Umwelt ist...

nicht wichtig ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ wichtig

☐ weiss nicht

Für die Untersuchung von komplexen Problemstellungen/Ereignissen muss der Zugverkehrsleiter in die Simulation integriert sein.

stimmt nicht ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ stimmt

☐ weiss nicht

Eine integrierte Simulation Lokführer - Zugverkehrsleiter/Betriebszentrale ist für die Ausbildung notwendig.

stimmt nicht ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ stimmt

☐ weiss nicht